

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.3.011:631.53.027

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-1-86-90



Исследование зависимости диэлектрической проницаемости дражируемой массы от размеров драже

Сергей Андреевич Андреев[✉], канд. техн. наук, доцентenergo-andreev@rgau-msha.ru[✉]*Владимир Владимирович Дубов*, преподаватель

volodya.dubov.00@mail.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. Размер драже без остановки процесса наращивания оболочки можно определить по величине диэлектрической проницаемости дражируемой массы. Для подтверждения данной гипотезы составлены и проанализированы математические выражения, характеризующие соотношения объемов материалов оболочки драже, объектов дражирования и воздуха. При теоретическом исследовании процесса наращивания оболочки сделаны допущения об одновременном увеличении диаметра объектов дражирования и о шарообразной форме образующихся драже. Расчеты производились на примере плоских электродов с размещенной между ними дражируемой массой. Дражируемая масса рассматривается как материальная субстанция, заполняющая пространство между обкладками конденсатора и обладающая переменной диэлектрической проницаемостью. Установлено, что увеличение размера драже приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости дражируемой структуры. Доказано, что диэлектрическая проницаемость среды является функцией диаметра объекта дражирования и также зависит от количества находящихся между пластинами объектов. Выявленная зависимость использована для получения информации о наращивании оболочки в непрерывном режиме. В производственных условиях измерение диэлектрической проницаемости дражируемой массы может осуществляться по величине переменного электрического тока, протекающего через анализируемую среду.

Ключевые слова: дражиратор, драже, дражируемая масса, семена, скорость движения, диэлектрическая проницаемость среды

Формат цитирования: Андреев С.А., Дубов В.В. Исследование зависимости диэлектрической проницаемости дражируемой массы от размеров драже // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 1. С. 86-90. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-1-86-90.

© Андреев С.А., Дубов В.В., 2023

ORIGINAL PAPER

Study of the relationship between the dielectric permittivity of the pellet mass and the pellet size

Sergey A. Andreev[✉], CSc (Eng), Associate Professorasa-finance@yandex.ru[✉]*Vladimir V. Dubov*, lecturer

volodya.dubov.00@mail.ru

Russian Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Institute of Mechanical and Power Engineering named after V.P. Goryachkin; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Abstract. The pellet size can be determined without stopping the shell build-up by the dielectric permittivity of the pellet mass. To confirm this hypothesis, mathematical expressions describing the relationships between the amount of materials of the pellet shell, pelleted objects and air have been compiled and analysed. During theoretical study of the shell build-up, assumptions were made on simultaneous increase in diameter of the pellet objects and on spherical shape of the formed pellets. The authors made calculations using the example of flat electrodes with the pellet mass placed between them. The pellet mass is treated as a material substance that fills the space between the electrodes and has a variable dielectric permittivity. It was found that increasing the pellet size leads to a decrease in the dielectric permittivity of the pelleted object structure. The dielectric permittivity of the medium is proved to be a function of the object diameter that depends on the number of objects between the plates. The identified relationship was used to obtain information about the shell build-up in a continuous mode. Under production conditions, the dielectric permittivity of the pellet mass may be measured by the value of alternating electric current flowing through the medium under analysis.

Keywords: pelletizer, pellet, pellet mass, seeds, velocity of movement, dielectric constant

For citation: Andreev S.A., Dubov V.V. Study of the relationship between the dielectric permittivity of the pellet mass and the pellet size. Agricultural Engineering (Moscow), 2023;25(1):86-90. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-1-86-90>.

Введение. Эффективность дражирования семян зависит от поддержания оптимального соотношения между размером драже и скоростью движения рабочей поверхности. С увеличением диаметров образующихся драже скорость движения рабочей поверхности должна возрастать [1, 2]. В барабанных дражирователях эта скорость определяется частотой вращения рабочего органа, в транспортерных дражирователях – поступательным движением ленты.

Измерение размеров драже является трудоемкой операцией, требующей остановки процесса и извлечения проб. Иногда используют электромеханические пробоотборники, в состав которых входят электронно-оптические приборы, фиксирующие увеличение размеров драже по изменению светового потока, проходящего через кольца с образовавшимися драже [3]. Но для таких устройств необходима тщательная настройка при каждом цикле дражирования, а достоверность результатов измерений зависит от влажности драже.

Замечено, что при размещении дражируемой массы между двумя электродами, подключенными к источнику переменного напряжения, величина образующегося тока зависит от размера драже. Это свидетельствует об изменении величины электрической емкости между электродами¹:

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{F}{d}, \quad (1)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды между электродами; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$; F – площадь электродов, м²; d – расстояние между электродами, м.

Величины ε_0 , F и d , входящие в выражение (1), не зависят от параметров среды между электродами. Следовательно, состояние среды может оказать влияние только на величину ε , которая в свою очередь влияет на электрическую емкость, емкостное сопротивление и емкостной ток. На основе обнаруженной зависимости разработан дражирователь, на рабочей поверхности которого размещались электроды, образующие плоский конденсатор [4]. По величине переменного тока, протекающего в цепи с этим конденсатором, можно косвенным образом судить о диэлектрической проницаемости дражируемой массы, которая меняется с изменением размеров входящих в нее драже. Однако пока не дано объяснение используемого эффекта и не раскрыты физические закономерности, составляющие его основу.

Цель исследований: теоретически обосновать зависимость диэлектрической проницаемости дражируемой массы от размеров драже и представить ее математическое описание.

Материалы и методы. В качестве исходных материалов использованы результаты рекогносцировочных экспериментов, свидетельствующие о наличии зависимости величины переменного электрического тока в цепи с плоскими электродами от размеров драже, размещенных между ними. Для объяснения физической сущности исследуемой зависимости и определения ее количественных характеристик произведен теоретический анализ влияния размеров драже на диэлектрическую проницаемость дражируемой массы на основе известных физических закономерностей, а также геометрических построений и алгебраических преобразований.

Результаты и их обсуждение. Рассмотрим основные этапы дражирования с точки зрения материалов, находящихся на рабочей поверхности дражирователя. В начале процесса (на этапе T_1^1) на рабочей поверхности дражирователя находятся исходные семена. Этап T_2^1 начинается с момента добавления водяной суспензии и измельченных до фракции 0,1 мм диатомитно-песочной и глиняно-песочной смеси – материала будущей оболочки (МБО)² [5]. Дражируемая масса находится в непрерывном движении, при этом МБО постепенно налипает на семена, образуя оболочку шарообразной формы. По окончании налипания смеси начинается этап T_3^1 , при котором семена уже покрыты первым слоем оболочки и представляют собой драже в виде шариков (рис. 1). При последующем добавлении водяной суспензии и МБО происходят аналогичные процессы, которые можно обозначить как T_2^2 и T_3^2 . На этапах T_2^i и T_3^i различаются дражируемые объекты: на этапе T_2^1 исходными объектами являются семена, а на этапе T_2^2 – драже с первым слоем оболочки. Циклы могут повторяться:

$$T_2^3, T_2^4, T_2^5 \dots T_2^i \dots T_2^n \text{ и т.д.,}$$

где i – текущий номер цикла добавления водной суспензии и МБО; n – суммарное количество циклов.

Представляет интерес процесс наращивания оболочки при уже свершившемся добавлении водяной суспензии и МБО на этапе T_2^i . Доказательству подлежит наличие разности значений диэлектрической проницаемости дражируемой массы в начале и в конце этапа T_2^i . Те же различия будут иметь место при сравнении состояния дражируемой массы в начале этапов T_2^i и T_3^i .

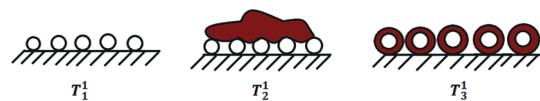


Рис. 1. Схема этапов дражирования
Fig. 1. Scheme of the pelletizing stages

¹ Иоссель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г. Расчет электрической емкости. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоиздат, 1981. 288 с.

² Мухин В.Д. Дражирование семян сельскохозяйственных культур. М.: Колос, 1971. 95 с.

Наличие МБО в начале этапа T_2^i в виде своеобразного локального скопления является весьма условным. В реальных условиях МБО как концентрируется на поверхности семян, так и располагается в пространстве между ними. Поэтому сделаем допущение, что дражируемая масса имеет состояние, представленное на рисунке 2.

На этапе T_2^i компоненты МБО перераспределяются между исходными объектами дражирования и, налипая на них, образуют оболочку. Изменения в дражируемой массе сопровождаются изменением соотношения размеров объектов дражирования и объема воздушного пространства между ними.

Диэлектрическая проницаемость среды ϵ прямо пропорциональна напряженности электрического поля E_0 , создаваемого токопроводящим электродом, и обратно – напряженности электрического поля E в однородной среде: $\epsilon = E_0/E$. С другой стороны, согласно свойствам^{3,4}, напряженность поля определяется как $E = \frac{U}{d}$. Можно ожидать, что изменение однородности среды между электродами при дражировании вызовет изменение напряженности поля, а вслед за ним – изменение диэлектрической проницаемости и электрической емкости.

Рассмотрим два варианта заполнения межэлектродного пространства.

1. Размеры объекта дражирования соизмеримы с расстоянием между электродами: $d \cong D$ (рис. 3).

Диаметр объекта дражирования можно выразить через его радиус $D = 2R$. Тогда объем объекта дражирования будет выглядеть как $V_c = \frac{4}{3}\pi R^3$ или $V_c = \frac{1}{6}\pi D^3$. Представим объем через массу и плотность: $V = \frac{m_c}{\rho_c}$. Отсюда

$$D^3 = \frac{6V_c}{\pi} = \frac{6m_c}{\pi\rho_c} \text{ и } D = \sqrt[3]{\frac{6m_c}{\pi\rho_c}}$$

В результате подстановки последнего выражения в формулу (1) получим

$$C = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S}{\sqrt[3]{\frac{6m_c}{\pi\rho_c}}} = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S \cdot \sqrt[3]{\pi\rho_c}}{\sqrt[3]{6m_c}}, \quad (2)$$

откуда

$$\epsilon = \frac{C \cdot \sqrt[3]{6m_c}}{\epsilon_0 \cdot S \cdot \sqrt[3]{\pi\rho_c}} = \frac{E_0}{E}$$

При этом

$$E = \frac{F_3}{q}$$

где F_3 – сила, действующая со стороны электрического поля на заряд q ; $F_3 = \frac{kq_1 \cdot q}{r^2}$.

Принимая во внимание последнее выражение, запишем:

$$E = \frac{kq_1 \cdot q}{q \cdot r^2} = \frac{kq_1}{r^2},$$

где $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$; q_1 и q – электрические заряды, взаимодействующие между собой в электрическом поле и создающие кулоновскую силу F .

Тогда
$$\frac{C \cdot \sqrt[3]{6m_c}}{\epsilon_0 \cdot S \cdot \sqrt[3]{\pi\rho_c}} = \frac{E_0 \cdot 4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot r^2}{q_1} \quad (3)$$

Из равенства (3) выразим E_0 :

$$E_0 = \frac{C \cdot \sqrt[3]{6m_c} \cdot q_1}{\epsilon_0 \cdot S \cdot \sqrt[3]{\pi\rho_c} \cdot 4\pi \cdot r^2}$$

С учетом зависимости емкости от напряжения, создаваемого единичным электрическим зарядом q_1 , между электродами $C = \frac{U}{q_1}$.

В таком случае

$$E_0 = \frac{U \cdot \sqrt[3]{6m_c} \cdot q_1}{\epsilon_0 \cdot q_1 \cdot S \cdot \sqrt[3]{\pi\rho_c} \cdot 4\pi \cdot r^2} \quad (4)$$

Сократив выражение (4) на единичный заряд q_1 , получим

$$E_0 = \frac{U \cdot \sqrt[3]{6m_c}}{\epsilon_0 \cdot S \cdot \sqrt[3]{\pi\rho_c} \cdot 4\pi \cdot r^2}$$

Из последнего выражения следует, что напряженность поля, создаваемого в вакууме, прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости среды. В свою очередь, диэлектрическая проницаемость зависит от массы и плотности объектов дражирования. При этом знак этой зависимости определяется соотношением аргументов.

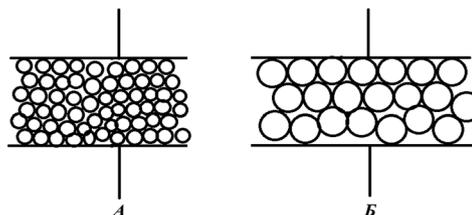


Рис. 2. Дражируемые структуры в начале и по окончании этапа T_2^i

Fig 2. Dried structures at the beginning and at the end of stage T_2^i

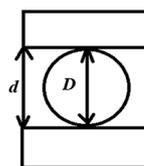


Рис. 3. Расположение объекта дражирования между электродами при $d \cong D$
Fig 3. Position of the pelleted object between the electrodes at $d \cong D$

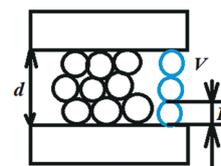


Рис. 4. Расположение объектов дражирования между электродами при $D < d$
Fig 4. Position of pelleted objects between electrodes at $D < d$

³ Рез И.С., Поплавко Ю.М. Диэлектрики. Основные свойства и применение в электронике. М.: Радио и связь, 1989. 288 с.

⁴ Богородицкий Н.П., Волокобинский Ю.М., Воробьев А.А., Тареев Б.М. Теория диэлектриков. М. – Л.: Энергия, 1965. 344 с.

2. Размеры объектов дражирования явно меньше расстояния между электродами: $D < d$ (рис. 4).

Представим объем V пространства между электродами суммой объемов V_c объектов дражирования и воздуха между ними:

$$V = n \cdot V_c + V_b, \tag{5}$$

где n – количество объектов дражирования между электродами.

На рисунке 5 представлено пространство между объектами дражирования. Формирование седлового тела на основании гиперболического треугольника, вершинами которого являются точки касания равных по размерам объектов дражирования, представлено на рисунке 5 б, в. Окружности, пересекающиеся в точках касания объектов дражирования, формируют равносторонний треугольник AOB (рис. 5 г). Данный треугольник спроецируем на другую плоскость в форме равностороннего треугольника CDF . Соединяя вершины треугольников AOB и CDF , получим объемную фигуру – правильную призму $AOBCDF$, у которой боковое ребро AC является ее высотой (h).

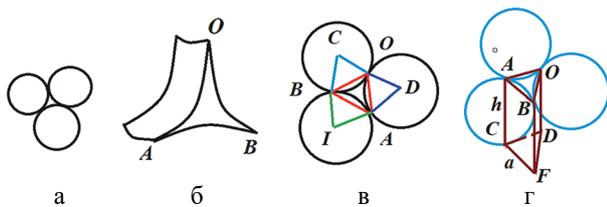


Рис. 5. Воздушное пространство между касающимися объектами дражирования:
в плоскости (а), в пространстве (б, в, г)

Fig. 5. Airspace between the touching pelleted objects:
in plane (a), in space (b, c, d)

Выразим объем воздуха V_b через разность объема правильной призмы V_n и суммарного объема $V_{c.ш.}$ n -го количества объектов дражирования, условно принимаемых за тела шарообразной формы:

$$V_b = V_n - n \cdot V_{c.ш.} \tag{6}$$

Объем правильной призмы рассчитывается по формуле⁵:

$$V_n = \frac{a^2 \cdot \sqrt{3}}{4} h, \tag{7}$$

где a – сторона основания (сторона равностороннего треугольника CDF); h – высота призмы (сторона AC прямоугольника $ABCF$).

$$V_{c.ш.} = \frac{2}{3} \pi R^3 \cdot \left(1 - \cos \frac{\varphi}{2}\right),$$

где φ – угол между высотой соответствующего сектора и радиусом шарообразного объекта дражирования.

Тогда
$$V_b = \frac{a^3 \sqrt{3}}{4} h - \frac{2}{3} \pi R^3 \left(1 - \cos \frac{\varphi}{2}\right).$$

Подставим полученное выражение в формулу (1):

$$V = nV_c + V_b = nV_c + \frac{a^3 \sqrt{3}}{4} h - \frac{2}{3} \pi R^3 \left(1 - \cos \frac{\varphi}{2}\right). \tag{8}$$

Принимая во внимание, что объем шара с радиусом R определяется как $V_c = \frac{4}{3} \pi R^3$, запишем выражение (8):

$$V = \frac{4}{3} n \pi R^3 + \frac{a^3 \sqrt{3}}{4} h - \frac{2}{3} \pi R^3 \left(1 - \cos \frac{\varphi}{2}\right) = \frac{2n}{3} \pi R^3 \left(2 - 1 + \cos \frac{\varphi}{2}\right) + \frac{a^3 \sqrt{3}}{4} h,$$

или
$$\frac{2}{3} \pi R^3 \left(1 - \cos \frac{\varphi}{2}\right) = \frac{4V - a^3 \sqrt{3} \cdot h}{4},$$

откуда
$$R^3 = \frac{12V - 3a^3 \cdot \sqrt{3} \cdot h}{8 \cdot \left(1 - \cos \frac{\varphi}{2}\right)}. \tag{9}$$

Поскольку $R = \frac{D}{2}$, то можно записать $R^3 = \frac{D^3}{8}$. Следовательно, $D^3 = 8R^3$.

Таким образом, выражение (9) можно представить как

$$D^3 = \frac{12V - 3a^3 \cdot \sqrt{3} \cdot h}{\left(1 - \cos \frac{\varphi}{2}\right)},$$

или
$$D = \sqrt[3]{\frac{12V - 3a^3 \cdot \sqrt{3} \cdot h}{\left(1 - \cos \frac{\varphi}{2}\right)}}. \tag{10}$$

Поскольку $D^3 = \frac{6V_c}{\pi}$ и $V_c = \frac{m_c}{\rho_c}$, то можно записать:

$$\frac{6m_c}{\rho_c} = \frac{12V - 3a^3 \cdot \sqrt{3} \cdot h}{\left(1 - \cos \frac{\varphi}{2}\right)},$$

откуда
$$m_c = \frac{12V - 3a^3 \cdot \sqrt{3} \cdot h}{\pi \cdot \left(1 - \cos \frac{\varphi}{2}\right)} \cdot \frac{\rho_c}{6} = \frac{2V - 0,5a^3 \cdot \sqrt{3} \cdot h}{\pi \cdot \left(1 - \cos \frac{\varphi}{2}\right)} \cdot \rho_c.$$

Обозначим количество драже, способных разместиться друг за другом по прямой линии между электродами, символом k . Тогда $d = kD$, откуда

$$\sqrt[3]{\frac{12V - 3a^3 \cdot \sqrt{3} \cdot h}{\pi \cdot \left(1 - \cos \frac{\varphi}{2}\right)}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{k \cdot C}. \tag{11}$$

Из равенства (11) выразим диэлектрическую проницаемость ε :

$$\varepsilon = \frac{k \cdot C}{\varepsilon_0 S} \cdot \sqrt[3]{\frac{12V - 3a^3 \cdot \sqrt{3} \cdot h}{\pi \cdot \left(1 - \cos \frac{\varphi}{2}\right)}}, \tag{12}$$

или
$$\varepsilon = \frac{k \cdot U}{\varepsilon_0 S \cdot q_1} \cdot \sqrt[3]{\frac{12V - 3a^3 \cdot \sqrt{3} \cdot h}{\pi \cdot \left(1 - \cos \frac{\varphi}{2}\right)}}. \tag{13}$$

⁵ Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы. М.: Книга по требованию. 2014. 832 с.

Анализ выражения (13) показывает, что диэлектрическая проницаемость среды между электродами зависит от количества объектов дражирования, способных разместиться друг за другом по прямой линии между электродами. Следовательно, в процессе наращивания оболочки (по мере увеличения размеров драже) величина k будет уменьшаться, определяя уменьшение диэлектрической проницаемости. Линейный характер исследуемой зависимости незначительно нарушается функцией косинуса половины угла между центром шарообразного объекта дражирования и точкой его касания с соседним объектом. Эта функция присутствует в знаменателе подкоренного выражения. Однако ее влияние на диэлектрическую проницаемость является довольно слабым по причине небольшого диапазона изменения аргумента по мере увеличения диаметра драже, а также ввиду кубической степени корня.

Список использованных источников

1. Андреев С.А., Загинайлов В.И., Тарушкин В.И. Электротехнологические приемы в процессе дражирования семян // *Международный научный журнал*. 2016. № 4. С. 79-86. EDN: UEIYOW
2. Михеев Д.А. Дражирование семян сахарной свеклы центробежным дражиратором с лопастным отражателем. Горки: БГСХА, 2017. 180 с. EDN: OVDIRL
3. Способ дражирования семян и устройство для его осуществления: Авторское свидетельство SU1690579 A1, МКИ A01C1/06 / С.А. Андреев, А.Л. Андержанов, Э.В. Белоусов, Д.Н. Пивоваров. № 4717344; заявл. 11.07.1989; опубл. 15.11.1991. Бюл. № 42. EDN: TWMNIQ
4. Устройство для дражирования семян: Авторское свидетельство SU1782388 A1, МКИ A01C1/06 / С.А. Андреев, А.Л. Андержанов, В.Н. Старовойтов, Л.А. Ленский, Д.Н. Пивоваров. № 4879989/15; заявл. 06.11.1990; опубл. 23.12.1992. Бюл. № 47. EDN: KIDDHD
5. Сохроков А.М., Каскулов М.Х., Жинов МХ. Оптимизация процесса нанесения искусственной оболочки на поверхность семян // Тезисы докладов II конференции молодых ученых КБНЦ РАН. Нальчик: КБНЦ РАН, 2001. С. 24-26.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 30.07.2022; поступила после рецензирования и доработки 21.01.2023; принята к публикации 23.01.2023

Выводы

1. Процесс дражирования сопровождается уменьшением диэлектрической проницаемости среды, заполняющей пространство между параллельно расположенными плоскими электродами.
2. Зависимость диэлектрической проницаемости дражируемой массы от размеров объектов дражирования может быть использована для получения информации о наращивании оболочки в непрерывном режиме (без остановки процесса).
3. Измерение диэлектрической проницаемости дражируемой массы в производственных условиях может осуществляться по величине переменного электрического тока, протекающего через анализируемую среду.

References

1. Andreev S.A., Zagainailov V.I., Tarushkin V.I. Electrotechnological methods used in seed pelleting. *International Scientific Journal*. 2016;4:79-86. (In Rus.)
2. Mikheev D.A. Pelleting sugar beet seeds with a centrifugal pan with a paddle reflector. Gorki, BSKHA, 2017. 180 p.
3. Andreev S.A., Anderzhanov A.L., Belousov E.V., Pivovarov D.N. Method of seed pelleting and device for its implementation: Copyright certificate SU1690579 A1, МКИ A01C1/06. No. 4717344; 1991. (In Rus.)
4. Andreev S.A., Andrezhanov A.L., Starovoitov V.N., Lensky L.A., Pivovarov D.N.: USSR author's certificate No. 1782388 USSR MКИ A 01 C1/06 Device for seed pelleting 4879989/15, 1992. (In Rus.)
5. Sokhrokov A.M., Kaskulov M.Kh., Zhinov M.Kh. Optimization of applying an artificial shell to the surface of seeds. *Tezisy dokladov II konferentsii molodykh uchenykh KBNTS RAN*. Nalchik, KBNTS RAS, 2001:24-26. (In Rus.)

Conflict of interests

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

Received 25.06.2022; revised 21.01.2023; accepted 23.01.2023