

ления $\psi_2(\omega)$ целесообразно использовать постоянное токоограничение в обеих зонах $I_{\text{эл.макс}} = \text{const}$. В системах двузонного ЭП с зависимым управлением потокосцеплением $\psi_2(\omega)$ принципиально возможна реализация зависимого токоограничения $I_{\text{эл.макс}}(\omega)$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Чиликин, М.Г. Основы автоматизированного электропривода: учеб. пособие для вузов / М.Г. Чиликин, М.М. Соколов, В.М. Терехов, А.В. Шинянский. – М.: Энергия, 1974 – 568 с.
2. Булгаков, А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / А.А. Булгаков. – М.: Энергоиздат, 1982. – 216 с.
3. Фираго, Б.И. Теория электропривода: учеб. пособие / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – Мн.: Техноперспектива, 2004. – 527 с.
4. Мальцева, О.П. Системы управления электроприводов: учеб. пособие / О.П. Мальцева, Л.С. Удуг, Н.В. Кояин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 82 с.

5. Дементьев, Ю.Н. Автоматизированный электропривод: учеб. пособие / Ю.Н. Дементьев, А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. – Томск: ТПУ, 2009. – 224 с.

6. Фираго, Б.И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – Мн.: Техноперспектива, 2006. – 363 с.

7. Прищепов, М.А. Расчет статических характеристик асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором в двигательном и генераторном режимах при частотном регулировании скорости и стабилизации потока возбуждения статора / М.А. Прищепов, Д.И. Иванов, Е.М. Прищепова // Агропанорама. – 2016. – № 6 (118). – С. 20-30.

8. Прищепов, М.А. Расчет предельных механических и электромеханических характеристик при частотном регулировании скорости в разомкнутой системе преобразователь частоты-асинхронный двигатель / М.А. Прищепов, Е.М. Прищепова // Агропанорама. – 2021. – № 5 (147). – С. 15-27.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 23.03.2022

УДК 633.43

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОДНОЙ СЕКЦИИ ЭЛЕКТРОАКТИВАТОРА БИОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЯЧМЕНЯ

О.В. Бондарчук,

ст. преподаватель каф. электротехнологии БГАТУ

И.В. Протосовицкий,

декан агроэнергетического факультета БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В статье изложена методика расчета электродной секции электроактиватора биологической системы ячменя, которая позволяет определить ее геометрические параметры и потребляемую мощность.

Ключевые слова: напряженность, напряжение, электрическое поле, электроактиватор, электродная секция, конструкция, пивоваренный ячмень, солод.

A method for calculating the electrode section of the electric activator of the biological system of barley is presented in the article. It allows determining its geometric parameters and powering consumption.

Key words: tension, voltage, electric field, electric activator, electrode section, design, malting barley, malt.

Введение

В Республике Беларусь ежегодно производится более 135 тысяч тонн солода [1]. Основным сырьем для его производства служит пивоваренный ячмень [2]. Солод определяет качество и количество конечного продукта производства – пива.

Повысить качество солода можно обработкой пивоваренного ячменя химическими, биологическими и физическими способами. Среди наиболее перспективных и экологически чистых выделяют электрофизические. До настоящего времени разработка конструкции устройств, реализующих

указанные способы, выполнялась, в основном, с целью предпосевной обработки семян [3-7]. В частности, было предложено устройство стимулятора всхожести [8], представляющее собой бифилярную обмотку. Недостатком данной конструкции является недоиспользование полезной площади проводников, так как только одна половина обмотки задействована в создании напряженности в рабочей зоне.

В настоящей работе предложена конструкция электродной секции электроактиватора, используемого в производстве солода из пивоваренного ячменя. Секция выполнена из проводников, параллельно уложенных на диэлектрическое основание, что

позволило снизить длину проводникового материала и устранить вышеуказанный недостаток.

Целью работы является разработка методики расчета электродной секции электроактиватора биологической системы ячменя для обеспечения требуемой дозы энергетического воздействия на зерно.

Основная часть

Электроактиватор биологической системы ячменя состоит из рабочего органа (электродной секции) и устройства перемещения зерна в зоне электрообработки. Структурная схема электроактиватора и электродная секция представлены на рисунках 1, 2.

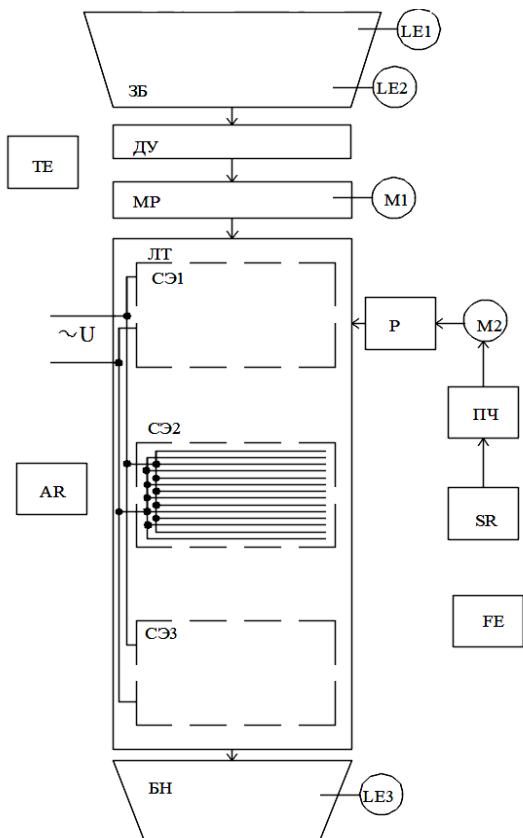


Рисунок 1. Структурная схема электроактиватора:

ЗБ – загрузочный бункер; ДУ – дозирующее устройство; МР – механизм распределения зерна в один слой; ЛТ – лента, транспортирующая зерно; СЭ1...СЭ3 – секция электродов; Р – редуктор; ПЧ – преобразователь частоты; SR – тахометр; FE – датчик потока; TE – датчик температуры; AR – датчик влажности; БН – бункер накопительный; LE1... LE3 – датчики уровня; M1 – электропривод дозирующего устройства; M2 – электропривод транспортирующего устройства

Задача расчета электродной секции электроактиватора заключается в определении конструктивных размеров (длина и ширина секции, расстояние между электродами, их количество в секции и диаметр, толщина изоляции, а также толщина поверхности, на

которой располагают обрабатываемый ячмень, и другие). Необходимо также определить величину напряжения, подаваемого на электроды, скорость движения зерна в рабочей зоне, тока и потребляемой мощности.

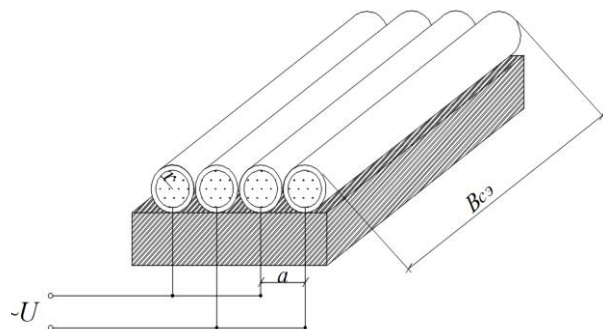


Рисунок 2. Электродная секция:

a – расстояние между центрами электродов; *r* – радиус электрода; *B_{э3}* – длина секции электродов

Исходными данными к расчету служат технологические требования к процессу соложения – технологическая схема, производительность, доза энергии, диапазон напряженности электрического поля в зоне обработки, экспозиция, режим обработки, влажность зерна и другие [9].

Расчетная схема системы электродов в режиме загрузки изображена на рисунке 3.

Электроды являются самым важным элементом электроактиватора. Основное требование к ним – обеспечение равномерной электрообработки зерна, а доза энергии *Q_v*, вводимая в ячмень, должна оказывать влияние на связанную воду, но не испарять ее из зерна.

Размеры секции электродов зависят от производительности установки и скорости движения сырья в рабочей зоне. Скорость движения сырья (м/с) определяется по формуле:

$$v_l = \frac{P_M}{3600 \cdot A \cdot \rho}, \tag{1}$$

где *P_M* – производительность электроактиватора, т/ч;

A – площадь поперечного сечения зерна на ленте, м²;

ρ – насыпная плотность ячменя, т/м³.

$$A = B_{э3} \cdot h_3, \tag{2}$$

где *B_{э3}* – ширина слоя зерна (соответствует длине секции электродов и зависит от ширины транспортирующей ленты), м;

h₃ – высота одного слоя зерна, м.

Ширину ленты *B_л* принимают стандартную: 300; 400; 500; 650; 800; 1000; 1200 мм и т.д. Тогда длина секции электродов будет на 0,02 м меньше:

$$B_{э3} = B_l - 0,02 \tag{3}$$

Ширина секции электродов, м:

$$L_{э3} = v_l \cdot \tau_{об}, \tag{4}$$

где *τ_{об}* – время обработки, с [10].

Число электродов в секции (электроды расположены вплотную друг к другу):

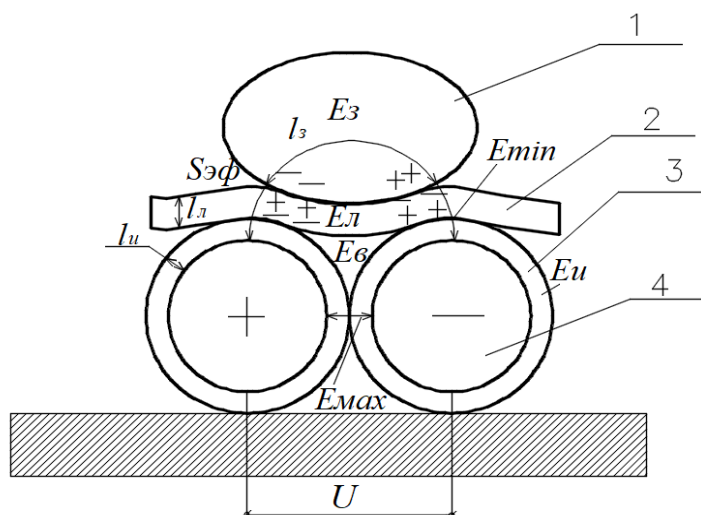


Рисунок 3. Расчетная схема:

- 1 – зерновка; 2 – транспортирующая лента;
- 3 – изоляция электродов; 4 – токопроводящие электроды;
- E – напряженность электрического поля:

$$n_3 = \frac{L_{c3}}{d_3}, \quad (5)$$

где d_3 – диаметр электродов с изоляцией, м.

Прежде чем обосновать диаметр электродов, определим напряжение, необходимое для ввода в зерно требуемой дозы энергии Q_v , величина которой установлена по итогам многофакторного эксперимента [10].

С учетом указанных допущений, напряженность электрического поля в зерновке, В/м:

$$E_3 = \sqrt{\frac{Q_v}{0,555 \cdot 10^{-10} \cdot \epsilon_3 \cdot \text{tg} \delta \cdot f \cdot \tau_{об}}}, \quad (6)$$

где ϵ_3 – диэлектрическая проницаемость зерна;
 $\text{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь;
 f – частота, Гц.

Теоретическая зависимость напряженности поля в зерновке от необходимой величины дозы энергии построена в прикладной программе MathCad 15 (рис. 4).

При проектировании установки следует учитывать, что существуют граничные условия, обусловленные электрическими характеристиками системы.

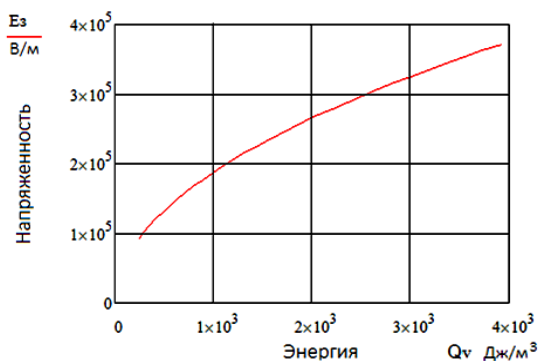


Рисунок 4. Зависимость напряженности в зерне от необходимой величины дозы энергии

Напряжение ограничено пробивным напряжением изоляции электродов, а межэлектродное расстояние – электрической прочностью диэлектриков и воздуха. Так как ячмень – биологический объект, то граничными условиями для него являются температура и напряженность электрического поля в зерне. Согласно источнику [11], напряженность установлена опытным путем и составляет 0,6 МВ/м. Выше указанного значения происходит угнетение зародыша.

Известно, что чем больше расстояние между электродами, тем большее напряжение необходимо подавать на них. Учитывая, что плотность зарядов (напряженность электрического поля) зависит от кривизны поверхности электродов (возрастает при увеличении положительной кривизны – выпуклость и убывает при увеличении отрицательной кривизны – вогнутость), в качестве электродов принимается медный изолированный провод марки ПВ.

Стандартное сечение провода выбираем из каталогов заводов-изготовителей (2,5; 4; 6; 10 мм²), в соответствии с которым определяем диаметр электродов и толщину изоляции.

Поверхность (транспортирующая лента) должна быть выполнена из материала, позволяющего перемещать пищевое сырье. В производстве используют пищевую резину, ПВХ пленку или силикон. Исходя из экономической эффективности и с учетом минимальных потерь энергии, толщину необходимо выбрать минимальную.

Принимаем следующие допущения, не вносящие заметной погрешности: расчет ведется для зерновок пивоваренного ячменя со средними геометрическими размерами, а также рассматривается распределение только средних силовых линий электрического поля.

Напряжение, подаваемое на электроды, применительно к расчетной схеме (рис. 3):

$$U = \frac{E_3 \cdot l}{\epsilon_u \cdot \epsilon_l} \cdot \frac{(2 \cdot \epsilon_l \cdot \epsilon_3 \cdot l_u + 2 \cdot \epsilon_u \cdot \epsilon_3 \cdot l_l + \epsilon_u \cdot \epsilon_l \cdot l_3)}{(2 \cdot l_u + l_3 + 2 \cdot l_l)}, \quad (7)$$

где l – длина средней линии, проходящей от электродов через середину зерновки, м;

l_u – толщина изоляции электродов, м;

l_l – толщина ПВХ ленты транспортера, м;

l_3 – длина средней силовой линии в зерновке, м;

$\epsilon_u, \epsilon_l, \epsilon_3$ – диэлектрическая проницаемость изоляции электродов, ленты и зерна.

$$l = 2 \cdot l_u + l_3 + 2 \cdot l_l. \quad (8)$$

Величину расчетного напряжения следует сравнить с предельным. При напряжении на электродах 4 кВ и выше, в изоляции электродов возникают частичные разряды и корона проводов.

Следует учитывать, что электрическая прочность изоляции проводов и ленты – 6...8 МВ/м, а воздуха – 3,2 МВ/м. Поэтому напряженность поля в межэлек-

тродном пространстве определяется на основании теоремы Гаусса для данной системы электродов (рис. 1):

$$E_{\max} = \frac{U(a-r)}{a-2r} \left(\frac{1}{2r^2} + \frac{1}{2(a-r)^2} \right), \quad r \neq a, \quad (9)$$

где r – радиус электродов без изоляции, м;
 a – расстояние между электродами, м.

Если $E_{\max} < E_{np}$, то система электродов выбрана верно.

Зная емкость, при проектировании и разработке секции электродов также необходимо определить емкость электродной системы для определения силы тока и потребляемой мощности.

Расчетная формула емкости цилиндрических электродов, вплотную расположенных друг к другу [12]:

$$C_{xx} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \varepsilon_{cp} \cdot B_{c3} \cdot n \frac{1}{\sqrt{\frac{a}{2r} - 1}}, \quad (10)$$

где ε_{cp} – усредненная абсолютная диэлектрическая проницаемость, Ф/м;

n – число электродов одного знака.

Емкость системы в рабочем режиме:

$$C_n = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \varepsilon_{экр} \cdot B_{c3} \cdot n \frac{1}{\sqrt{\frac{a}{2r} - 1}}, \quad (11)$$

где $\varepsilon_{экр}$ – эквивалентная абсолютная диэлектрическая проницаемость, Ф/м;

$$\varepsilon_{экр} = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i \cdot S_i}{S_{эф}} \cdot l, \quad (12)$$

где ε_i – диэлектрическая проницаемость изоляции электродов, ленты и зерна;

S_i – поперечное сечение изоляции электродов, ленты и зерна, м²;

l_i – длина участка, по которому проходит поток вектора электрической индукции, м;

$S_{эф}$ – эффективная площадь изоляции электродов, ленты и зерна, м².

При подаче ячменя на электроды происходит изменение емкости системы:

$$\Delta C = C_n - C_{xx}, \quad (13)$$

что, в свою очередь, ведет к изменению емкостной проводимости системы, см:

$$\Delta b = \omega \cdot \Delta C, \quad (14)$$

где ω – угловая частота, с⁻¹.

Изменение емкостной проводимости системы электродов влечет изменение тока в цепи, А:

$$\Delta I = U \cdot \Delta b = U \cdot \omega \cdot \Delta C, \quad (15)$$

что приводит к изменению полной мощности, потребляемой секцией электродов, ВА:

$$\Delta S = U \cdot \Delta I = U^2 \cdot \omega \cdot \Delta C. \quad (16)$$

При активной проводимости $g_u = 0$ система электродов активной мощности не потребляет, нагрузка будет только емкостная. Полная мощность будет численно равна реактивной мощности. При $g_u \neq 0$ активная мощность, Вт:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi. \quad (17)$$

Реактивная мощность, ВАр:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi. \quad (18)$$

Полная мощность, ВА:

$$S = U \cdot I = \sqrt{Q^2 + P^2}. \quad (19)$$

При $g_u \neq 0$ наблюдается стекание зарядов с электродов, что ведет к снижению емкости системы «зерно – диэлектрик – электроды».

В этом случае нагрузка носит активно-емкостной характер. Поэтому, чтобы уменьшить потребление активной мощности, изоляция электродов и лента транспортера должна быть сухой, а зерно – стандартной влажности.

Заключение

Разработанная методика расчета, основанная на поглощении зерном требуемой дозы энергии, позволяет определить геометрические размеры электродов, напряжение на них и потребляемую мощность. Предложенная конструктивная схема секции электродов, в отличие от ранее разработанных, имеет меньшую материалоемкость, и напряженность создается только в рабочей зоне. Методика может быть применена для расчета аналогичных систем в устройствах предпосевной обработки семян с целью увеличения всхожести.

По данной методике рассчитана и разработана электродная секция электроактиватора ячменя со следующими характеристиками: напряжение на электродах – 0...4000 В; полная мощность, потребляемая секцией электродов – 1...3 ВА; сила тока – 1...4 мА; напряженность в зоне электрообработки – 100...670 кВ/м.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Почему для аграриев пивоваренный ячмень – одна из самых проблемных культур [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://yandex.by/turbo?text=https%3A%2F%2Fwww.sb.by%2Farticles%2Fchuvstvo-soloda.html>. – Дата доступа: 29.11.2021.
2. Ячмень пивоваренный. Технические условия: ГОСТ 5060 – 86. – Введ. 01.07.1988. – М.: Стандартинформ, 2010. – 6 с.
3. Бородин, И.Ф. Электрофизические способы стимуляции роста растений / И.Ф. Бородин, К.Н. Щербаков // Техника в сельском хозяйстве. – 1988. – № 5. – С. 35.
4. Шмигель, В.В. Сепарация и стимуляция семян в электрическом поле: дис. ... док. техн. наук: 05.20.02 / В.В. Шмигель. – Кострома, 2004. – 405 с.

5. Корко, В.С. Электрофизические методы стимуляции растительных объектов / В.С. Корко, Е.А. Городецкая. – Минск: БГАТУ, 2013. – 232 с.

6. Старухин, Р.С. Метод предпосевной обработки семян с использованием эллиптического электромагнитного поля / Р.С. Старухин, И.В. Белицын, О.И. Хомутов // Ползуновский вестник. – 2009. – С. 97-103.

7. Пашинский, В.А. Стимулирование прорастания пивоваренного ячменя / В.А. Пашинский, О.В. Бондарчук // Агропанорама. – Минск, 2008. – № 6. – С. 26-28.

8. Корко, В.С. Моделирование и исследование электрического поля стимулятора всхожести семян / В.С. Корко, Н.И. Ермалицкий // Современная сельскохозяйственная техника: исследование, проектирование, применение: матер. Международ. науч.-практич. конф., Минск, 26-28 мая 2010 г. – Минск: БГАТУ, 2010. – Ч. 1. – С. 46-49.

9. Способ обработки пивоваренного ячменя в сухом виде: пат. 22032 Респ. Беларусь, МПК С12С 1/02 О.В. Бондарчук, В.А. Пашинский, Н.Ф. Бондарь; заяв. Белор. гос. аграр. техн. ун-т. – № а 20160040; заявл. 10.02.2016; опубл. 30.10.2017 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2017. – № 5. – С. 21.

10. Пашинский, В.А. Моделирование и оптимизация процесса электрофизической стимуляции пивоваренного ячменя для повышения его экстрактивности / В.А. Пашинский, О.В. Бондарчук // Вестник МГУП. – 2019. – № 2 (27). – С. 38-49.

11. Гордеев, А.М. Электричество в жизни растений / А.М. Гордеев, В.Б. Шешнев. – М.: Наука, 1991. – 160 с.

12. Тарушкин В.А. Исследование электрического поля диэлектрического сепаратора с цилиндрическими электродами / В.А. Тарушкин // Сб. науч. тр. МИИМП. – 1979. – Т. 16, вып. 5. – С. 26-31.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 09.03.2022

Независимая навеска и система стабилизации штанги опрыскивателя «Мекосан-2500-18»

Предназначена для снижения амплитуды колебаний штанги и повышения надежности ее несущей конструкции.

Применение разработки позволяет эффективно гасить колебания штанги, возникающие вследствие движения колес опрыскивателя по неровности поверхности поля, что обеспечивает высокую равномерность распределения пестицидов по обрабатываемому объекту, а также повышение надежности несущей конструкции штанги.



Основные технические данные

Марка машины	Мекосан-2500-18
Производительность за 1 час времени, га:	
- сменного	10,9
- эксплуатационного	10,7
Система навески штанги на остов опрыскивателя	Независимая
Способ крепления рамки штанги к остоу опрыскивателя	Параллелограммная навеска
Амплитуда колебаний краев штанги, м	до 0,1
Рабочая скорость движения, км/ч	9-12
Качество выполнения технологического процесса:	
- неравномерность распределения рабочей жидкости по ширине захвата, %, не более	15
- снижение неравномерности распределения рабочей жидкости по ширине захвата, %, не менее	5
Габаритные размеры опрыскивателя в транспортном положении, мм, не более	6045x2425x2215
Габаритные размеры опрыскивателя в рабочем положении (при высоте установки штанги 600 мм), мм, не более	6045x18250x2215
Дорожный просвет, мм	350
Увеличение массы опрыскивателя, кг	на 120