

**В. С. Корко, П. В. Кардашов, И. Б. Дубодел**

*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»  
г. Минск, Республика Беларусь  
E-mail: innadubodel@gmail.com, Korko.S@mail.ru*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОВОДИМОСТИ И КИНЕТИКИ ЭЛЕКТРОДНОГО НАГРЕВА ДИСПЕРСНОЙ ОРГАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

*Аннотация.* Рассмотрены особенности термических и электротехнологических способов обработки кормовых материалов, приведены результаты исследований электрической проводимости вещества зерна и увлажненной массы, кинетики электродного нагрева дисперсной системы в зависимости от определяющих факторов.

*Ключевые слова:* кормовые материалы, зерно, электрическая проводимость, дисперсная система, степень увлажнения, температура.

**V. S. Korko, P. V. Kardashov, I. B. Dubodel**

*El "Belarusian State Agrarian Technical University"  
Minsk, Republic of Belarus  
E-mail: innadubodel@gmail.com, Korko.S@mail.ru*

## **STUDY OF CONDUCTIVITY AND KINETICS OF ELECTRODE HEATING OF A DISPERSE ORGANIC SYSTEM**

*Abstract.* The features of thermal and electrotechnological methods of processing feed materials are considered, the results of studies of the electrical conductivity of the grain substance and moistened mass, the kinetics of electrode heating of the dispersed system, depending on the determining factors, are presented.

*Keywords:* feed materials, grain, electrical conductivity, dispersed system, degree of hydration, temperature.

### **Введение**

Основная цель термической обработки кормовых материалов – обеззараживание и перевод трудноперевариваемых высокомолекулярных природных полимеров (например, лигнина в соломе, крахмала в зерне и др.) в более легкоусвояемые низкомолекулярные формы, создание благоприятных условий для жизнедеятельности микрофлоры желудка животных.

При традиционных способах обработки применяется преимущественно термическое высокотемпературное (более 100°C) воздействие (обработка паром, горячим воздухом, инфракрасными лучами и т.п.), что требует относительно высоких энергозатрат, не в полной мере обеспечивает использование биологического потенциала корма, а также вызывает денатурацию белков, потерю витаминов и другие негативные последствия [1].

С помощью электрического тока, протекающего по обрабатываемому материалу, можно дополнительно к основному термическому фактору добавить физико-химические воздействия (электрокинетические явления, насыщение ткани ионами, повышение интенсивности массопереноса, проницаемости, активности ионов и др.), интенсифицировать химические превращения, снизить расход энергии. При этом в полной мере возможно использование преимуществ электрического тока как комплексного технологического фактора, оказывающего термическое, электрофизико-химические и биологические действия на обрабатываемый материал [1, 2].

Основные требования при электродном способе электрического нагрева дисперсных органических материалов – обеспечение соответствующих условий для достижения достаточной проводимости кормового материала и выбор оптимальных параметров для согласования скорости нагрева и интенсивности физико-химических преобразований биополимеров.

Цель работы – исследование проводимости и кинетики электродного нагрева дисперсных органических систем.

### Основная часть

Экспериментальные установки для исследования проводимости вещества зерна и дисперсной массы обеспечивали использование мостовых методов измерения сопротивления или вычислений его значений после измерений методом вольтметра-амперметра.

На рис. 1 приведены результаты исследования проводимости зерна ячменя в естественном виде в зависимости от температуры и влажности.

Полученные зависимости носят экспоненциальный характер, с ростом температуры и влажности удельная электрическая проводимость  $\gamma$  возрастает. Однако значение проводимости вещества зерна даже при высоких влажностях показывает, что в естественном виде зерно является несовершенным диэлектриком или полупроводником и не может обеспечивать прохождение низкочастотного электрического тока.

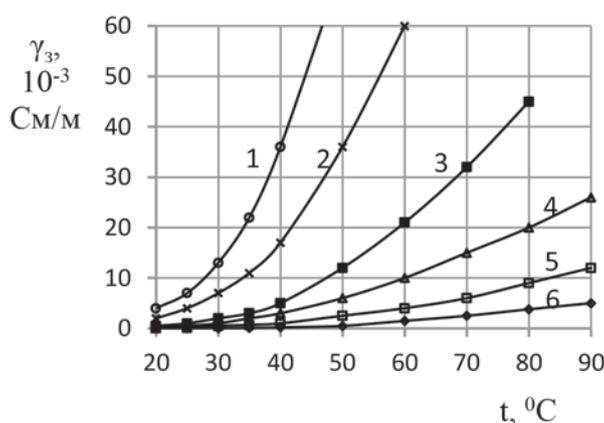


Рис. 1. Температурные характеристики проводимости вещества зерна ячменя при различной влажности: 1 – 30 %; 2 – 28 %; 3 – 26 %; 4 – 24 %; 5 – 20 %; 6 – 15 %

При электродном методе нагрева для повышения проводимости воды добавляют определенные количества соли (глауберовой, поваренной, сульфата натрия, тринатрийфосфата) или кальцинированной соды. Удельная проводимость раствора при температуре 20 °C в зависимости от концентрации солей может быть определена по эмпирической формуле [2]:

$$\gamma_{20} = \frac{C}{8 \cdot 10^3},$$

где  $C$  – суммарная концентрация солей, мг/л.

Существует зависимость проводимости проводников II рода от температуры, которую до начала заметного парообразования обычно выражают уравнением

$$\gamma_t = \gamma_{20} [1 + \alpha(t - 20)],$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент проводимости, °C<sup>-1</sup>.

Если к подготовленной массе корма, например измельченного или плющеного зерна, добавить водный раствор химреагентов в концентрациях, определенных зоотехническими условиями, то получим дисперсную систему с новыми электрофизическими характеристиками.

Для расчета обобщенной проводимости гетерогенных систем в виде биологических дисперсий наиболее применимым считают уравнение, полученное В. И. Оделевским [3], которое имеет вид:

$$\gamma = \gamma_p \left( 1 + \frac{3v(\gamma_z - \gamma_p)}{(1-v)(\gamma_z - \gamma_p) + 3\gamma_p} \right), \quad (1)$$

где  $\gamma$ ,  $\gamma_p$ ,  $\gamma_z$  – обобщенные проводимости соответственно гетерогенной системы, раствора и включений при начальной (фиксированной) температуре;  $v$  – объемная доля включений.

В зерновой массе с раствором объемную долю включений можно определить следующим образом:

$$v = 1 - \frac{V_p}{V} = 1 - \frac{m_p/\rho_p}{(m_z + m_p)/\rho} = 1 - \frac{m_z W \rho}{(m_z + m_z W)\rho_p} = 1 - \frac{W\rho}{(1+W)\rho_p}, \quad (2)$$

где  $m_p$ ,  $m_z$  – масса раствора и включений, кг;  $V_p$ ,  $V$  – объем, занимаемый раствором и системой в целом, м<sup>3</sup>;  $\rho_p$ ,  $\rho$  – объемная масса раствора и гетерогенной системы, кг/м<sup>3</sup>;  $W = \frac{m_p}{m_z}$  – степень увлажнения.

После преобразования с учетом (2) уравнение (1) принимает вид:

$$\gamma = \gamma_p \frac{3\gamma_p + \left[ 3 - \frac{2W\rho}{(1+W)\rho_p} \right] (\gamma_z - \gamma_p)}{3\gamma_p + \frac{W\rho}{(1+W)\rho_p} (\gamma_z - \gamma_p)}. \quad (3)$$

Таким образом, проводимость массы как дисперсной системы зависит от проводимостей раствора  $\gamma_p$  и вещества зерна  $\gamma_z$ , степени увлажнения  $W$ , объемной массы раствора  $\rho_p$ , влажности включений  $\omega$ . В свою очередь, объемная масса  $\rho$  зависит от степени измельчения зерна, степени увлажнения и усилия уплотнения, а проводимость всей дисперсной системы зависит от температуры.

Для исследования проводимости увлажненной зерновой массы методом ранжирования отобраны следующие определяющие факторы: температура  $t$ , степень увлажнения  $W$ , усилие уплотнения  $P$ , напряженность электрического поля  $E$ . Концентрацию раствора соли NaCl при увлажнении плющеного зерна толщиной хлопьев 0,001 м принимали равной 2 % от массы сухого вещества зерна.

При фиксированной температуре, например 20 °С, как показано на рис. 2, в интервалах изменения  $P = 10 \dots 50$  кПа и  $W = 0,6 \dots 0,9$  проводимость зерновой массы нелинейно возрастает с увеличением этих факторов, и зависимости аппроксимируются соответствующими полиномами второй степени:

$$\gamma = 0,205 + 0,003P - 2 \cdot 10^{-5} P^2 \quad \text{и} \quad \gamma = 0,456 - 0,892W + 0,809W^2.$$

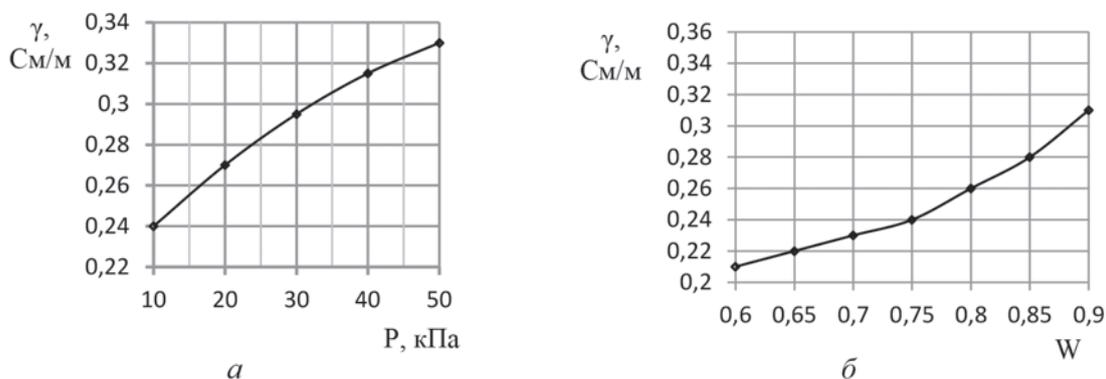


Рис. 2. Зависимость проводимости зерновой массы от усилия уплотнения (а) и степени увлажнения (б) при температуре 20 °С

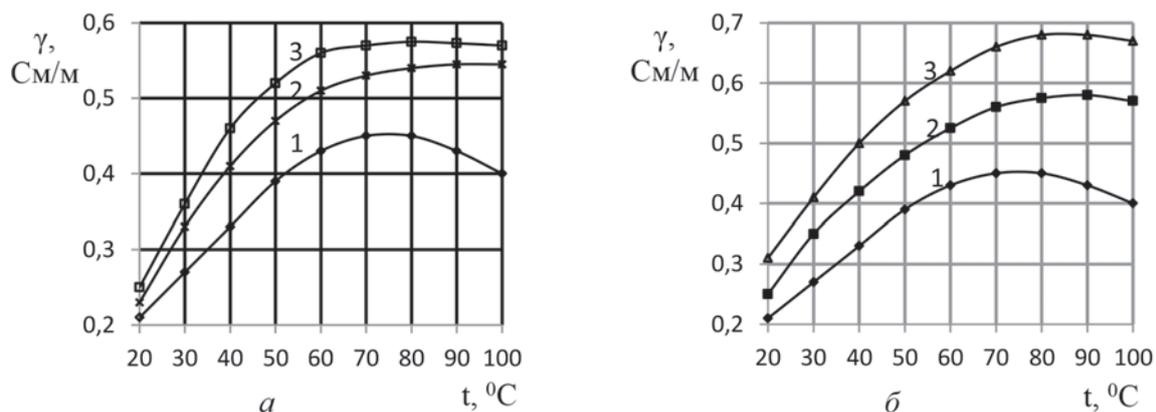


Рис. 3. Температурные характеристики проводимости зерновой массы:

*a* – при различной степени увлажнения: 1 – 0,6; 2 – 0,7; 3 – 0,8;

*б* – при изменении усилия уплотнения: 1 – 20; 2 – 25; 3 – 30 кПа

На рис. 3 приведены температурные характеристики проводимости зерновой массы в зависимости от степени увлажнения и усилия уплотнения. С повышением влажности растет проводимость зерновой массы, величиной которой определяются условия и интенсивность ввода в нее электрической энергии.

Как следует из анализа зависимостей на рис. 3, *a*, с ростом температуры, когда интенсифицируются процессы влагопереноса, набухают и увеличиваются в размере биополимеры, количество свободной влаги уменьшается вследствие поглощения ее веществом зерна и парообразования, скорость изменения проводимости зерновой массы после достижения температуры диапазона начала клейстеризации крахмала (60...70 °С) начинает снижаться, причем это заметнее для низких значений влажности.

Более устойчиво протекает процесс обработки при степени увлажнения зерновой массы  $W = 0,7$  и  $W = 0,8$ . При этом в диапазоне изменения температуры 20...90 °С проводимость зерновой массы возрастает в 2...2,5 раз. Температурная характеристика имеет явно выраженный нелинейный вид, особенно в зоне температур 50...70 °С, что объясняется происходящими структурными преобразованиями дисперсной системы вследствие деструкции биополимеров и изменения форм связи влаги. В технологически возможной зоне конечных рабочих температур (70...100 °С) изменение проводимости не превышает 0,02 См/м, что важно при создании аппаратов, реализующих электродный способ обработки.

Важным условием обеспечения надлежащего электрического контакта между частичками зерновой массы и электродами является уплотнение материала в рабочей камере. Недостаточное уплотнение массы (рис. 3, *б*, кривая 1) ухудшает устойчивость процесса обработки в связи со снижением проводимости при высоких температурах. С ростом  $P$  значительно изменяется соотношение между составляющими дисперсной системы, главным образом за счет вытеснения включений воздуха, перераспределения раствора в соответствии с распределением плотности массы по объему камеры. Достаточно устойчиво протекает процесс обработки при усилиях уплотнения  $P = 25...30$  кПа, даже при закипании не происходит выхода из рабочей камеры избытка раствора.

Таким образом, с точки зрения энергетических затрат [1], минимизации прочностных свойств рабочей камеры в качестве наиболее рациональных параметров следует принять  $W = 0,7$  и  $P = 25$  кПа.

На рис. 4 представлена температурная характеристика проводимости зерновой массы при различной напряженности электрического поля и базовых значениях других параметров:  $W = 0,7$  и  $P = 25$  кПа.

Температурную характеристику проводимости 2 на рис. 4 можно выразить в виде полинома 2-й степени:

$$\gamma_t = 0,009 + 0,013t - 8 \cdot 10^{-5}t^2.$$

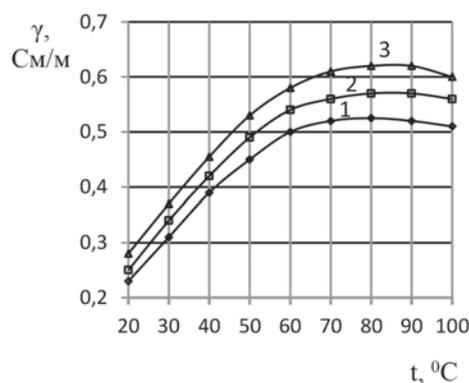


Рис. 4. Температурные характеристики проводимости зерновой массы при различной напряженности электрического поля: 1 – 1000; 2 – 2000; 3 – 3000 В/м

Напряженность электрического поля определяет скорость ввода электромагнитной энергии в обрабатываемый материал и в значительной степени влияет на степень преобразования вещества зерна и, в частности, клейстеризации крахмала.

В диапазоне  $E = 1000...3000$  В/м при фиксированной температуре проводимость  $\gamma$  возрастает, причем наибольшие изменения происходят в зоне интенсивных фазовых превращений, протекающих при температурах более  $60$  °С. Существенная зависимость проводимости зерновой массы от напряженности электрического поля, можно полагать, происходит вследствие поляризационных явлений в веществе зерна и взаимодействия ионов раствора с ионами вещества зерна. Как следует из анализа характеристик на рис. 4, наиболее устойчиво с точки зрения электроконтактных явлений и эффективно для выполнения целевой функции обеспечения равномерности температурного поля процесс нагрева происходит при  $E = 2000$  В/м.

Как следует из результатов исследования проводимости, вещество зерна и увлажненная зерновая масса как дисперсные системы являются термолабильными, что необходимо определенным образом учитывать при реализации технологических процессов [1, 4].

В условиях непроточной плоскопараллельной электродной системы, примененной в экспериментальных исследованиях, процесс нагрева однородного термолабильного материала в общем виде определяется из теплового баланса дифференциальным уравнением

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{1}{mC} \left[ U^2 \gamma_t \frac{h}{K} - kA(t - t_0) \right],$$

где  $m$  и  $C$  – соответственно масса, кг и удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·°С);  $U$  – напряжение, В;  $h$  и  $K$  – соответственно высота, м и геометрический коэффициент электродной системы;  $k$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $A$  – площадь поверхности теплопотерь, м<sup>2</sup>;  $t$ ,  $t_0$  – температура массы и окружающей среды, °С.

Кинетические кривые нагрева зерновой массы при различной напряженности электрического поля и базовых значениях  $W = 0,7$  и  $P = 25$  кПа приведены на рис. 5.

Как следует из анализа зависимостей на рис. 5, при обработке электрическим током обеспечивается высокая интенсивность нагрева, если напряженность поля достаточно высокая (порядка 2000 В/м и более), причем скорость нагрева массы в зависимости от напряженности поля изменяется непропорционально для различных температурных интервалов. Так, в интервале температур  $20...40$  °С при  $E = 2000$  В/м скорость нагрева  $\frac{dt}{d\tau} = 0,25$  °С/с и при  $E = 3000$  В/м  $\frac{dt}{d\tau} = 0,7$  °С/с, а в интервале  $70...90$  °С при тех же значениях напряженности поля скорость нагрева достигает соответственно 0,6 и 1,3 °С/с.

Объемный ввод электрической энергии в однородную массу обеспечивает равномерный нагрев (отклонение не превышает  $\pm 5$  °С) и при этом отмечается несколько более быстрое повышение температуры у фазного электрода из-за контактных явлений. Расчетная энергоемкость процесса обработки не превышает 80 кВт·ч/т.

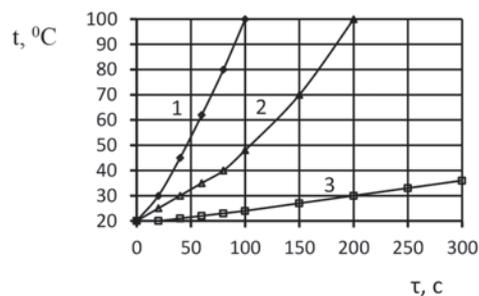


Рис. 5. Кинетика нагрева зерновой массы при различных значениях напряженности поля в рабочей камере:  
 1 –  $E = 3000$  В/м; 2 –  $E = 2000$  В/м; 3 –  $E = 1000$  В/м

Энергия, выделившаяся в массе при изменении температуры в диапазоне 20...100 °С, возрастает в 2...2,5 раза, что связано с нелинейной температурной характеристикой проводимости зерновой массы и физико-химическими превращениями в материале. Значительное увеличение мощности в конце обработки необходимо учитывать при расчете аппаратов для обработки электрическим током, при выборе допустимой (с точки зрения электрической прочности) напряженности электрического поля.

### Заключение

Результаты исследований показывают, что величину удельной электрической проводимости дисперсной органической системы в значительной степени определяют температура, усилие уплотнения, степень увлажнения и напряженность электрического поля. Приведенные факторные зависимости необходимо учитывать при обосновании режима работы установок электродного нагрева кормовых материалов, а также устройств регулирования их мощности, стабилизации параметров.

Величина проводимости и характер ее температурной зависимости позволяет классифицировать увлажненную раствором соли массу корма в условиях технологического процесса электродной обработки как проводник с преимущественно ионным характером проводимости. Благодаря объемному вводу энергии вся масса нагревается практически равномерно по всему объему электродной камеры, что трудно достижимо при косвенном нагреве (паром, горячим воздухом, инфракрасными лучами и т.п.) вследствие низкой тепло- и теплопроводности вещества корма, а также происходящих процессов преобразования биополимеров. С учетом фактической температурной зоны клейстеризации крахмала (55...65 °С) и обеспечения высокой равномерности нагрева в электродной камере можно ограничиться конечной температурой обработки зерновой массы порядка 75...80 °С, что позволит существенно снизить энергоемкость процесса и значительно уменьшить или нивелировать процессы денатурации белков и витаминов. Так как выделяемая в процессе нагрева мощность в квадратичной степени зависит от напряженности электрического поля, то для согласования скорости нагрева и динамики физико-химических превращений крахмала можно ограничиться значениями  $E = 2000$  В/м,  $W = 0,7$  и  $P = 25$  кПа. При этом время обработки составит около 3 мин.

### Список использованных источников

1. Корко, В. С. Повышение эффективности процессов переработки и контроля влагосодержания злаков электрофизическими методами / В. С. Корко. – Минск: БГАТУ, 2006. – 349с.
2. Электротехнологии: пособие / И. Б. Дубодел [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2014. – 252 с.
3. Оделевский, В. И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем / В. И. Оделевский // Журнал технической физики. – 1951. – Т. 21, вып. 6. – С. 667–685.
4. Прищепов, М. А. Основы термозависимого резистивного электронагрева в технологических процессах сельскохозяйственного производства / М. А. Прищепов. – Минск: БГАТУ, 1999. – 295 с.