

ментьев, И.А. Чернышев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 213 с.

4. Чиликин, М.Г. Теория автоматизированного электропривода: учебное пособие для вузов / М.Г. Чиликин, В.И. Ключев, А.С. Сандлер. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.

5. Гусев, Н.В. Автоматизация технологических комплексов и систем в промышленности: учебное пособие по курсовому проектированию / Н.В. Гусев, С.В. Ляпушкин, М.В. Коваленко; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 186 с.

6. Прищепов, М.А. Структурные схемы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором для частотно-регулируемого электропривода со скалярным и векторным управлением / М.А. Прищепов, В.А. Дайнеко, Е.М. Прищепова // Известия Нацио-

нальной академии наук Беларуси. Серия аграрных наук. – 2019. – Том 57. – № 4. – С. 481–493.

7. Удут, Л.С. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 7. Теория оптимизации непрерывных многоконтурных систем управления электроприводов: учебное пособие / Л.С. Удут, О.П. Мальцева, Н.В. Кояин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 164 с.

8. Удут, Л.С. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 1. Введение в технику регулирования линейных систем. Часть 2. Оптимизация контура регулирования: учебное пособие / Л.С. Удут, О.П. Мальцева, Н.В. Кояин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 156 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 06.04.2020

УДК 633.43

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ЗЕРНА ЯЧМЕНЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

О.В. Бондарчук,

ст. преподаватель каф. электротехнологии БГАТУ

В статье описывается влияние электрического поля на переход влаги из связанного в свободное состояние в зерне пивоваренного ячменя.

Ключевые слова: напряженность, частота, электрическое поле, свободная влага, пивоваренный ячмень, солод.

The article describes the influence of electric field on moisture transfer from bound to free condition in brewing barley grain.

Keywords: voltage, frequency, electric field, free moisture, brewing barley, malt.

Введение

Согласно технологии [1], начальным процессом солодоращения является увеличение содержания свободной влаги в ячмене. Влага запускает последующие ферментативные процессы.

По мнению Гордеева А.М. и Шешнева В.В. [2], процесс выделения влаги протекает наиболее интенсивно при низких частотах.

Можно предположить, что наложение электрического поля данной частоты будет способствовать увеличению кинетической энергии связанных молекул воды в структуре зерна и их переход в свободное состояние.

Цель настоящей работы – описать механизм влияния электрического поля на переход связанной влаги в свободную в структуре зерна ячменя.

Основная часть

Используя известные представления о влиянии электромагнитного поля на зерно как диэлектрик, примем следующие упрощения: зерно расположено между электродами, к которым приложено напряжение пере-

менного тока; зерно однородно по механическим и электрофизическим параметрам и может считаться изотропными сферами; перенос теплоты и влаги между зернами-сферами незначителен.

Исходя из этих предположений и принципов неравновесной термодинамики [3], определяющие уравнения тепловлагопереноса с учетом приложенного электрического поля можно представить в виде:

для локального влагосодержания M , кг/кг

$$\rho_s \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \rho_s D_v \frac{\partial M}{\partial r} \right) - m_{ev}; \quad (1)$$

для температуры сферического зерна T , К

$$\rho_s C_{Ps} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda_s \frac{\partial T}{\partial r} \right) - m_{ev} \Delta h + \Phi. \quad (2)$$

Поскольку изменение во времени плотности локальной влаги мало [4], то для интенсивности ее выделения справедливо соотношение:

$$m_{ev} = - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{D_v M_{H_2O}}{RT} \frac{\partial P_v}{\partial r} \right), \quad (3)$$

где t – время, с;
 r – радиальная координата от центра сферы, м;
 D_v – эффективный коэффициент диффузии влаги в зерне, м²/с;

$M_{H_2O} = 18$ – молярная масса воды, г/моль;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(К·моль);

P_v – давление водяного пара в зерне, Па;

ρ_s – плотность сухого вещества зерна, кг/м³;

C_{Ps} – удельная теплоемкость влажного вещества зерна при постоянном давлении, Дж/(кг·К);

λ_s – теплопроводность влажного вещества зерна, Вт/(м·К);

Δh – локальная теплота парообразования, Дж/кг;

Φ – удельная объемная электрическая мощность, выделяющаяся в зерне в виде теплоты, Вт/м³.

Удельная объемная мощность Φ , которая выделяется в зерне в результате взаимодействия электрического поля с молекулами воды:

$$\Phi = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon' tg \delta E^2, \quad (4)$$

где f – частота электрического поля, Гц;

$tg \delta = \varepsilon'' / \varepsilon'$ – тангенс угла диэлектрических потерь;

ε'' – мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости;

ε' – диэлектрическая проницаемость зерна;

ε_0 – электрическая постоянная ($8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м);

E – напряженность электрического поля, В/м.

Согласно соотношению (4), мощность, выделяющаяся в зерне, пропорциональна его диэлектрической проницаемости, частоте и квадрату напряженности электрического поля. Электрическая энергия трансформируется в зерне в теплоту, аккумулированную молекулами воды. При этом электрическое поле определяет распределение теплоты в веществе зерна.

Если предположить, что электрическое поле около поверхности зерна однородное, но убывающее экспоненциально с увеличением глубины от поверхности материала, то напряженность электрического поля на концентрической оболочке при радиусе r от центра сферы может быть представлена как

$$E = E_0 \left[\exp(-\beta(R_p - r)) + \exp(-\beta(R_p + r)) \right], \quad (5)$$

где E_0 – напряженность электрического поля на поверхности сферической частицы, В/м;

R_p – радиус частицы (зерновки ячменя), м.

Коэффициент ослабления β , зависящий от диэлектрической проницаемости и частоты, определяется как

$$\beta = 2\pi f \left[\frac{1}{2} \varepsilon' \left((1 + tg \delta^2)^{1/2} - 1 \right) \right]^{1/2}. \quad (6)$$

Начальными и граничными условиями в уравнениях (1) и (2) являются:

$$M = M_0, \quad T = T_0 \quad \text{при } t = 0, \quad (7)$$

$$\left[\rho_s D \frac{\partial M}{\partial r} + \frac{D_v M_{H_2O}}{RT} \frac{\partial P_v}{\partial r} \right] = 0,$$

$$\left[\lambda_s \frac{\partial T}{\partial r} + \Delta h \frac{D_v M_{H_2O}}{RT} \frac{\partial P_v}{\partial r} \right] = 0 \quad \text{при } r = 0, \quad (8)$$

$$-\left[\rho_s D \frac{\partial M}{\partial r} + \frac{D_v M_{H_2O}}{RT} \frac{\partial P_v}{\partial r} \right] = h_M \frac{M_{H_2O}}{RT} (P_v - P_{v\infty}), \quad (9)$$

$$-\left[\lambda_s \frac{\partial T}{\partial r} + \Delta h \frac{D_v M_{H_2O}}{RT} \frac{\partial P_v}{\partial r} \right] = h_p (T - T_\infty) + h_M \frac{M_{H_2O}}{RT} (P_v - P_{v\infty}) \Delta h \quad \text{при } r = R_p, \quad (10)$$

где h_p – коэффициент теплоотдачи от поверхности зерна, Вт/(м²·К);

h_M – коэффициент массоотдачи, м/с;

T_∞ – температура окружающего воздуха, К.

Давление водяных паров в окружающем воздухе рассчитывается как

$$P_{v\infty} = \varphi P_{v\infty}^{sat}, \quad (11)$$

где φ – относительная влажность окружающего воздуха;

$P_{v\infty}^{sat}$ – давление насыщенных водяных паров, Па.

Давление водяных паров в материале сферы P_v определяется в зависимости от активности воды:

$$a_w = P_v / P_v^{sat}, \quad (12)$$

как функции температуры и влагосодержания.

Таким образом, при заданных зависимостях теплофизических параметров, характеризующих выбранный тип зерна, уравнения (1)–(9) позволяют определить влияние электрического поля на тепло-влажноперенос в зерне [4].

Для дальнейшего анализа введем осредненные значения влагосодержания, температуры и удельной объемной мощности по объему зерновой частицы как

$$\bar{M}(t) = \frac{4\pi}{V_p} \int_0^{R_p} r^2 M dr, \quad \bar{T}(t) = \frac{4\pi}{V_p} \int_0^{R_p} r^2 T dr, \quad (13)$$

$$\bar{\Phi}(t) = \frac{4\pi}{V_p} \int_0^{R_p} r^2 \Phi dr,$$

где V_p – объем частицы.

Тогда согласно вышеприведенным определениям, интегрирование уравнений (1)–(2) с учетом равенства (3) и граничных условий (11) позволяет получить следующую систему дифференциальных уравнений:

для среднего влагосодержания сферического зерна M , кг/кг

$$\rho_s \frac{d\bar{M}}{dt} = -\frac{4\pi R_p^2}{V_p} h_M \frac{M_{H_2O}}{RT} (P_v|_{r=R_p} - P_{v\infty}). \quad (14)$$

для средней температуры сферического зерна T , К

$$\rho_s C_{Ps} \frac{d\bar{T}}{dt} = -\frac{4\pi R_p^2}{V_p} \left[h_p (T|_{r=R_p} - T_\infty) + h_M \frac{M_{H_2O}}{RT|_{r=R_p}} (P_v|_{r=R_p} - P_{v\infty}) \Delta h \right] + \bar{\Phi}, \quad (15)$$

где $T|_{r=R_p} = \bar{T}$;

$P_v|_{r=R_p}$ – давление водяного пара на поверхности зерна.

Тогда уравнение (13) будет иметь вид:

$$\rho_s C_{Ps} \frac{d\bar{T}}{dt} = -\frac{4\pi R_p^2}{V_p} \left[h_p (\bar{T} - T_\infty) + h_M \frac{M_{H_2O}}{RT|_{r=R_p}} (P_v|_{r=R_p} - P_{v\infty}) \Delta h \right] + \bar{\Phi}. \quad (16)$$

Введем следующее предположение об изменении среднего влагосодержания в зерновой частице [5]. В начале процесса имеется небольшой период, когда влагосодержание материала меняется незначительно. Затем устанавливается постоянная скорость выделения влаги, в это время температура влажного материала изменяется также незначительно. Тогда уравнение (14) можно упростить и записать:

$$\rho_s \frac{d\bar{M}}{dt} = -N, \quad (17)$$

где N – параметр скорости выделения влаги является постоянной величиной.

Влагосодержание из уравнения (13) определим по формуле:

$$\bar{M}(t) = \bar{M}_0 + tN / \rho_s. \quad (18)$$

Учитывая уравнения (12) и (15), для расчета

средней температуры уравнение (14) можно записать в виде:

$$\rho_s C_{Ps} \frac{d(\bar{T} - T_\infty)}{dt} + \frac{4\pi R_p^2}{V_p} h_p (\bar{T} - T_\infty) = -N + \bar{\Phi}. \quad (19)$$

Здесь скорость выделения влаги N входит в качестве параметра, а правая часть уравнения постоянна. Применяв метод с разделяющимися переменными, можно показать, что решением уравнения (16) является зависимость:

$$\bar{T} - T_\infty = k_1 \exp\left(-\frac{4\pi R_p^2}{V_p \rho_s C_{Ps}} h_p t\right) + \frac{V_p}{4\pi R_p^2 h_p} (\bar{\Phi} - N). \quad (20)$$

Учитывая начальное условие при $t = 0$ $\bar{T} = T_0$, из последнего уравнения следует, что

$$k_1 = \bar{T}_0 - T_\infty - (\bar{\Phi} - N) V_p / (4\pi R_p^2 h_p).$$

$$\bar{T}(t) = T_\infty + \left(\bar{T}_0 - T_\infty - \frac{V_p}{4\pi R_p^2 h_p} (\bar{\Phi} - N) \right) \times \exp\left(-\frac{4\pi R_p^2}{V_p \rho_s C_{Ps}} h_p t\right) + \frac{V_p}{4\pi R_p^2 h_p} (\bar{\Phi} - N). \quad (21)$$

Таким образом, при известной температуре в начальный момент и разности температур $\bar{T}(t_k) - T_0$ в момент времени после обработки, из равенства (19) можно определить скорость выделения влаги N с учетом величины удельной объемной мощности $\bar{\Phi}$, а из равенства (16) рассчитать изменение влагосодержания.

В качестве начальных условий задают начальную температуру T_0 и влагосодержание M_0 частицы, относительную влажность ϕ и температуру T_∞ окружающего воздуха, частоту f и напряженность электрического поля E_0 .

В таблице 1 приведены теплофизические и диэлектрические характеристики параметров зернового материала от температуры и влагосодержания [6, 7].

Таблица 1. Теплофизические и диэлектрические характеристики зернового материала

Характеристика	Формула
Коэффициент диффузии влаги	$D = 7.67 \cdot 10^{-3} \exp(6140 / T)$
Коэффициент теплопроводности	$\lambda_s = 0.1337 + 0.252M$
Удельная теплоемкость	$C_{Ps} = 1260 + 3600(M / (1 + M))$
Локальная теплота парообразования	$\Delta h = -0.0469(T - 273.15)^2 - 13.493(T - 273.15) + 52202$
Давление насыщения водяных паров	$P_v^{sat} = 1.014 \cdot 10^5 \exp(13.765 - 5123 / T)$
Активность воды в материале зерновой частицы (изотерма сорбции)	$\ln a_w = -9.049 \exp(-21.065M) + 24.868 \exp(-27.994M) M^{1.022} \ln P_v^{sat}$
Диэлектрическая проницаемость	$\epsilon' = \left(0.7057 + 0.0380 \log_{10} f + 0.0114T(1 - 0.11 \log_{10} f) + 2.37 \cdot 10^{-7} \left(\frac{XT}{1 + \log_{10} f} \right)^2 \right) \times$ $\times (1 + 0.755(0.403 - 0.0265 \cdot \log_{10} f + 0.0434 \cdot X - 0.0072X \log_{10} f))^3$
Относительное влагосодержание	$X = 100M / (1 + M)$
Плотность зерна	$\rho_s = 610 \text{ кг/м}^3$

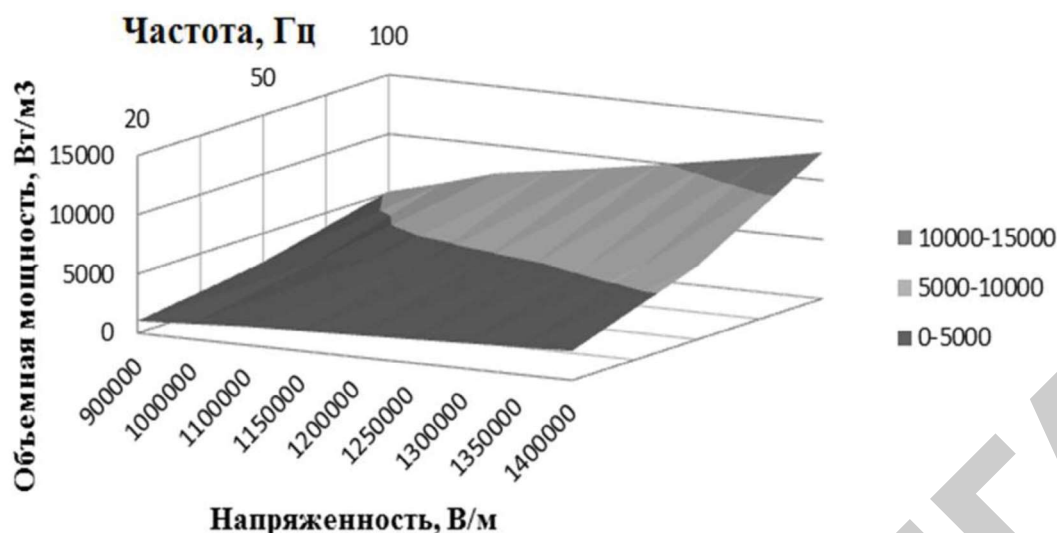


Рисунок 1. Зависимость объемной мощности, выделяющейся в зерне от напряженности и частоты электрического поля

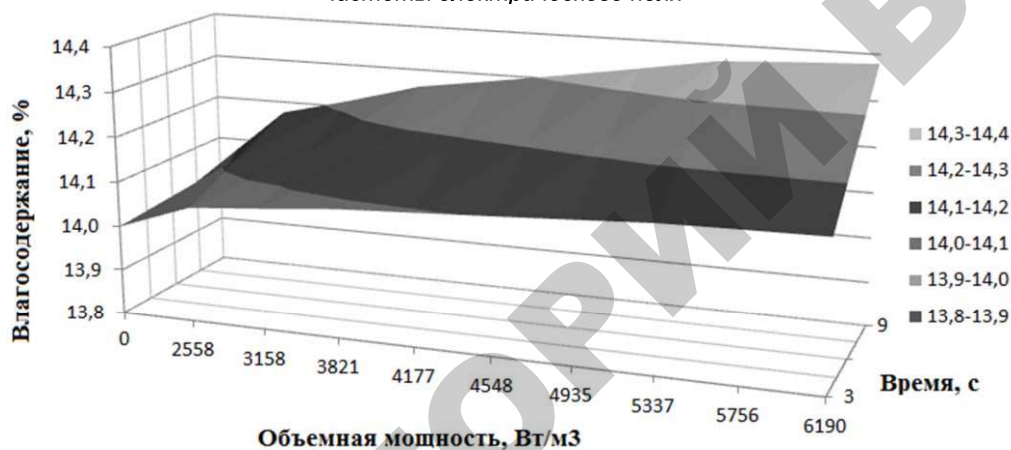


Рисунок 2. Зависимость влагосодержания в зерне ячменя от объемной мощности электрического поля и времени обработки

В результате численного эксперимента, по уравнениям (18)-(21) построены графические зависимости объемной мощности, выделяющейся в зерне от параметров электрического поля (напряженности и частоты) (рис. 1), и влагосодержания в зерне ячменя от объемной энергии (рис. 2). Также в НИАЛ НИИМЭСХ БГАТУ был проведен лабораторный эксперимент, результаты которого подтверждают теоретические расчеты численными результатами.

Заключение

В результате исследования получены аналитические закономерности преобразования влаги зерна в электрическом поле. Построенные по ним графические зависимости подтверждают влияние электрического поля на влагосодержание в зерне ячменя. Основными параметрами поля, оказывающими воздействие на влагу, являются напряженность и частота. Оптимальные параметры находятся в диапазоне: напряженность – 1,2-1,3 МВ/м, частота –

40-60 Гц. Данные зависимости позволяют моделировать и оптимизировать параметры электрообработки зерна.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Беланов, П.Е. Технология солода: учеб.-метод. пособие / П.Е. Беланов, И.В. Смотраева. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2014. – 82 с.
2. Гордеев, А.М. Электричество в жизни растений / А.М. Гордеев, В.Б. Шешнев. – М.: Наука, 1991. – 160 с.
3. Luikov, A.V. Systems of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies (Review) / A.V. Luikov // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1975. – P. 1-14.
4. Hii, C.L. Simulation of heat and mass transfer of cocoa beans under stepwise drying conditions in a heat pump dryer / C.L. Hii, C.L. Law M.C. Law // Applied Thermal Engineering. – 2013. – 54. – P. 264-271.

5. Самарский, А.А. Численные методы математической физики / А.А. Самарский, А.В. Гулин. – 2-е изд. – М.: Научный мир, 2003. – 316 с.

6. Pabis, S. Grain drying. Theory and practice / S. Pabis, D.S. Jayas, S.T. Cenkowski. – John Wiley & Sons, Inc. New York. – 1998. – 303 p.

7. Ratti, C. A new water sorption equilibrium expression for solid foods based on thermodynamic considerations / C. Ratti, G.H. Crapiste, E. Rotstein // Journal of Food Science. – 1989. – 54(3). – P. 738-747.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 01.04.2020

Радиоволновой влагомер зерна

Предназначен для непрерывного измерения влажности зерна в процессе сушки на зерносушильных комплексах.

Влагомер обеспечивает непрерывный контроль влажности зерна в потоке и автоматическую коррекцию результатов измерения при изменении температуры материала, имеет аналоговый выход – 4-20 мА, а также интерфейс – RS-485.



Основные технические данные

Диапазон измерения влажности зерна	от 9 до 25 %
Основная абсолютная погрешность	не более 0,5 %
Температура контролируемого материала	от +5 до +65 °С
Цена деления младшего разряда блока индикации	0,1 %
Напряжение питания	220 В 50 Гц
Потребляемая мощность	30 ВА

“Агропанорама” - научно-технический журнал для работников агропромышленного комплекса. Это издание для тех, кто стремится донести результаты своих исследований до широкого круга читателей, кого интересуют новые технологии, кто обладает практическим опытом решения задач.

Журнал “Агропанорама” включен в список изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим (сельскохозяйственное машиностроение и энергетика, технический сервис в АПК), экономическим (АПК) и сельскохозяйственным наукам (зоотехния).

Журнал выходит один раз в два месяца, распространяется по подписке и в розницу в киоске БГАТУ. Подписной индекс в каталоге Республики Беларусь: для индивидуальных подписчиков - 74884, предприятий и организаций - 748842.

Стоимость подписки на 1-е полугодие 2020 года: для индивидуальных подписчиков - 21,06 руб., ведомственная подписка - 24,51 руб.