

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА СОЛОДА ОБРАБОТКОЙ
ПИВОВАРЕННОГО ЯЧМЕНЯ В НЕОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ
INCREASING THE QUALITY OF MALT BY TREATING BREWING BARLEY
IN A NON-HOMOGENEOUS ELECTRIC FIELD**

**В. А. Пашинский¹, О. В. Бондарчук²
V. Pashynski¹, O. Bondarchuk²**

¹Учреждение образования «Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ
г. Минск, Республика Беларусь
Pashynski@mail.ru

²БГАТУ, г. Минск, Республика Беларусь,
guloks82@mail.ru

¹International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, ISEI BSU
Minsk, Republic of Belarus

²BGATU, Minsk, Republic of Belarus

Представлены результаты оценки размера пор пивоваренного ячменя не обработанного и обработанного неоднородным электрическим полем высокой напряженности, которые существенным образом влияют на количество влаги впитываемой в процессе его замачивания и, в конечном счете, влияют на расход энергоресурсов при его сушке при получении солода.

The results of estimating the pore size of malting barley not treated and treated with a non-uniform electric field of high tension are presented, which significantly affect the amount of moisture absorbed during its soaking and, ultimately, affect the energy consumption during drying during malt production.

Ключевые слова: пивоваренный ячмень, напряженность электрического поля, солод, влагопоглощение, сушка, энергоемкость сушки, экстракт солода.

Keywords: malting barley, electric field strength, malt, moisture absorption, drying, drying energy intensity, malt extract.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2024-2-208-211>

Введение. Способы обработки ячменя, повышающие качество солода, разделяют на химические, биологические и физические, из которых отдельно можно выделить электрофизические.

Применение данных способов в солодопроизводстве позволяет получить сравнительные изменения в показателях качества которые представлены в таблице 1 [1].

Таблице 1

Сравнительные изменения показателей качества солода после обработки

Способы обработки	Изменение показателей качества			
	Экстрактивность, %	Осахаривание, %	Энергия прорастания, %	Амилолитическая активность, %
Химические	1,5...2,0	15...20	4...6	10...15
Биологические	1,0...1,5	10...15	3...5	8...12
Физические	1,0...2,0	10...15	7...9	10...15
Электро-физические	1,0...2,0	15...20	2,5...7	12...19
Прогнозируемые значения	1,5...3,0	15...20	7...9	20...40

Эти показатели могут быть улучшены обработкой пивоваренного ячменя в электрическом поле промышленной частоты. Предварительная апробация подтверждает техническую возможность и более высокую эффективность предлагаемой обработки ячменя и тем самым решение проблемы – повышение качества солода.

Обобщение полученных результатов позволило сформулировать цель работы, для достижения которой определены основные задачи теоретических и экспериментальных исследований.

Решение задачи возможно только путем комплексного воздействия на сырье в процессе производства солода, что обеспечивается применением электрофизических методов обработки. Электрическое поле оказывает

влияние на различные взаимосвязанные биологические процессы, протекающие в зерне ячменя, позволяя достичь при его использовании изменения целого ряда характеристик сырья для производства солода.

Результаты предварительных исследований (таблица 1) показывают возможность и превосходство по отдельным показателям обработки зерна ячменя на промышленной частоте.

Изучив известные способы и устройства обработки зерна, установлено, что наиболее эффективный, экологичный, низкзатратный способ обработки пивоваренного ячменя для получения солода – электроактивация в переменном электрическом поле промышленной частоты [2]. Немаловажным является и то, что производимое воздействие является контролируемым и управляемым.

Осредненные значения влагосодержания, температуры и удельной объемной мощности по объему зерновой частицы с целью упрощения математического анализа:

$$\begin{aligned}\bar{M}(\tau) &= \frac{4\pi}{V_p} \int_0^{R_p} r^2 M dr, \\ \bar{t}(\tau) &= \frac{4\pi}{V_p} \int_0^{R_p} r^2 t dr, \\ \bar{\Phi}(\tau) &= \frac{4\pi}{V_p} \int_0^{R_p} r^2 \Phi dr,\end{aligned}\tag{1}$$

где V_p – объем частицы, м³;

r – радиальная координата от центра сферы, м;

– для среднего влагосодержания сферической зерновки M , кг/кг:

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

где ρ_s – плотность сухого вещества зерна, кг/м³;

h_M – коэффициент массоотдачи, м/с.

– для средней температуры сферического зерна t , °C:

$$\rho_s C_{Ps} \frac{d\bar{t}}{d\tau} = -\frac{4\pi R_p^2}{V_p} \left[h_p (t|_{r=R_p} - t_\infty) + h_M \frac{M_{H_2O}}{Rt|_{r=R_p}} (P_v|_{r=R_p} - P_{v\infty}) \Delta h \right] + \bar{\Phi},\tag{3}$$

где $t|_{r=R_p} = \bar{t}$;

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

Тогда:

$$\rho_s C_{Ps} \frac{d\bar{t}}{d\tau} = -\frac{4\pi R_p^2}{V_p} \left[h_p (\bar{t} - t_\infty) + h_M \frac{M_{H_2O}}{Rt|_{r=R_p}} (P_v|_{r=R_p} - P_{v\infty}) \Delta h \right] + \bar{\Phi}.\tag{4}$$

где ρ_s – плотность сухого вещества зерна, кг/м³;

h_M – коэффициент массоотдачи, м/с.

Влагосодержание:

$$\bar{M}(\tau) = \bar{M}_0 + \tau N / \rho_s.\tag{5}$$

Средняя температура:

$$\rho_s C_{Ps} \frac{d(\bar{t} - t_\infty)}{d\tau} + \frac{4\pi R_p^2}{V_p} h_p (\bar{t} - t_\infty) = -N + \bar{\Phi}.\tag{6}$$

Скорость выделения влаги N входит в качестве параметра, а правая часть уравнения постоянна. Применив метод с разделяющимися переменными, получим:

$$\bar{t} - t_\infty = k_1 \exp\left(-\frac{4\pi R_p^2}{V_p \rho_s C_{Ps}} h_p \tau\right) + \frac{V_p}{4\pi R_p^2 h_p} (\bar{\Phi} - N).\tag{7}$$

Учитывая начальное условие при $\tau = 0$ $\bar{t} = t_0$, получим

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

$$\bar{t}(\tau) = t_\infty + \left(\bar{t}_0 - t_\infty - \frac{V_p}{4\pi R_p^2 h_p} (\bar{\Phi} - N) \right) \exp\left(-\frac{4\pi R_p^2}{V_p \rho_s C_{ps}} h_p \tau \right) + \frac{V_p}{4\pi R_p^2 h_p} (\bar{\Phi} - N). \quad (8)$$

Удельная объемная мощность, которая выделяется в зерне в результате взаимодействия электрического поля с молекулами воды и ионами, рассчитывается по формуле (4).

Цель исследования – разработка способа обработки пивоваренного ячменя переменным электрическим полем высокой напряженности для повышения качества солода.

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

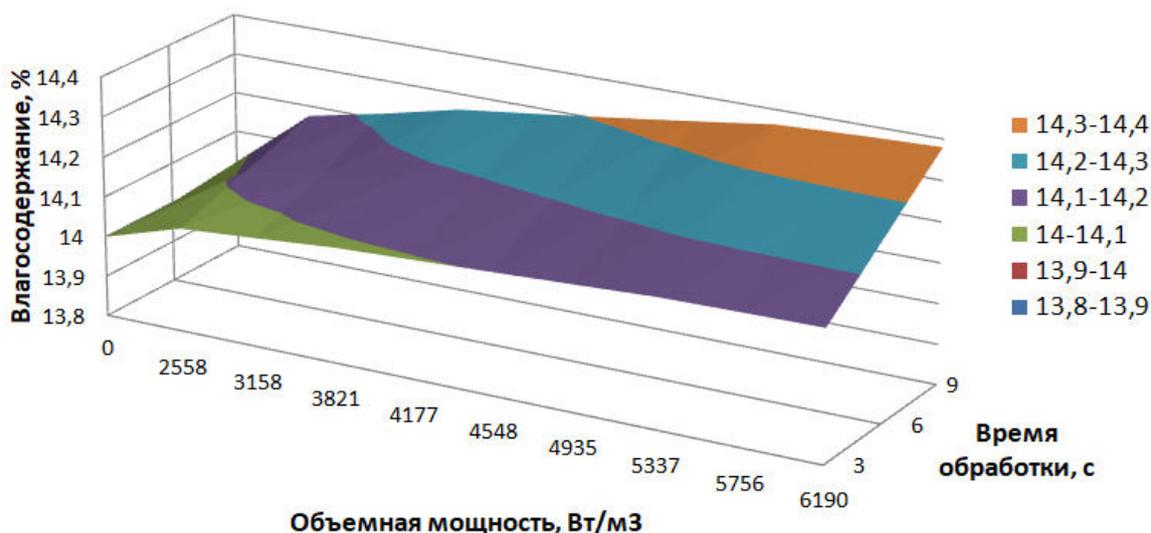


Рисунок 1 – Зависимость объемной мощности выделяющейся в зерне от напряженности и частоты электрического поля

Построенные по уравнениям графические зависимости подтверждают влияние электрического поля на изменение влагосодержание в зерне ячменя.

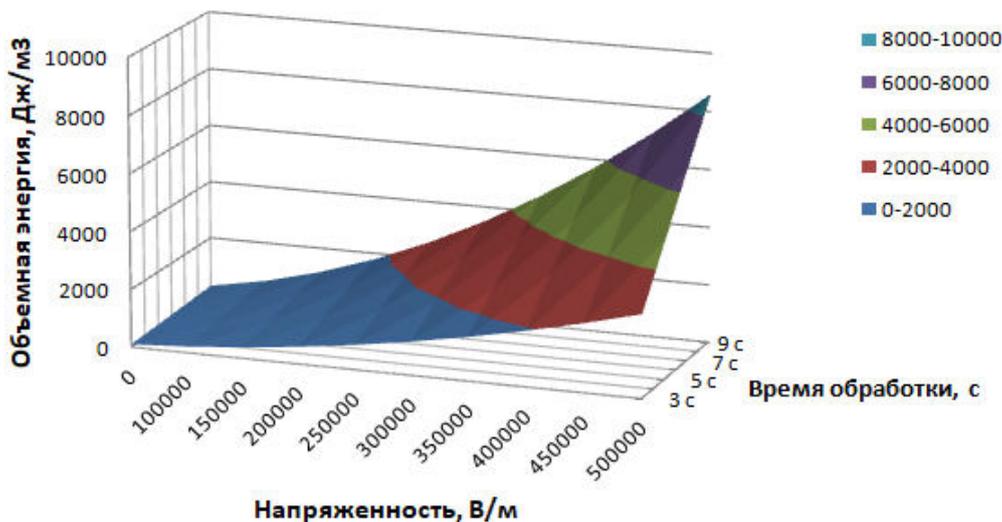


Рисунок 2 – Зависимость объемной энергии выделяющейся в зерне от напряженности и частоты электрического поля

Основными параметрами поля, оказывающими воздействие на влагу, являются напряженность и частота. Данные зависимости позволяют моделировать и оптимизировать параметры электрообработки.

При воздействии на зерно переменным неоднородным электрическим полем напряженностью 1,2–1,3 МВ/м влажность пивоваренного ячменя при замачивании меньше на 6,2%, зерно насыщается влагой медленнее, что

указывает на равномерное увлажнение мучнистого тела и лучшее растворение эндосперма. Это в дальнейшем дает более высокое содержание массовой доли экстракта в сухом веществе солода [2].

Сушку солода проводят подогретым воздухом с соблюдением определенного температурного режима (при сушке светлого солода температуру постепенно повышают с 25 до 75 – 80 °С, а при сушке темного – с 25 до 100–150 °С).

У сухого солода ростки после сушки становятся хрупкими, и их удаляют (отбивают на специальной машине), так как готовому пиву ростки придают горький и неприятный вкус. В процессе сушки влажность зеленого солода снижается с 40 – 50 до 4% при получении светлого и до 2% при получении темного солода.

Расход энергии на сушку солода определяли на основании материального и теплового баланса сушилки. Количество испаряемой влаги из солода при сушке, кг, можно определить по уравнению:

$$W = \frac{G_{вл}(W_{вл}-W_c)}{100-W_c} = \frac{G_c(W_{вл}-W_c)}{100-W_{вл}}, \quad W = G_{вл}(W_{вл}-W_c)/(100-W_c)$$

где $G_{вл}$ и G_c – масса свежепроросшего и свежесушенного солода, кг;

$W_{вл}$ и W_c – влажность свежепроросшего и свежесушенного солода, %.

Материальный баланс влаги, кг, солодовенной сушилки определяется по уравнению:

$$W = Ld_2 - Ld_0,$$

где W – количество влаги, удаляемой из солода при сушке, кг;

L – расход воздуха в сушилке, кг;

d_2 и d_0 – влагосодержание свежего и отработанного воздуха, кг/кг, для расчета принимаем $d_2=0,010$ кг/кг, $d_0=0,022$ кг/кг;

Тогда расход воздуха в сушилке, кг, можно определить по формуле

$$L = \frac{W}{d_2 - d_0}.$$

Основная масса влаги из солода при сушке удаляется при температурах до 50 °С, чтобы не происходила клейстеризация крахмала пивоваренного зерна. В конце периода сушки количество удаляемой влаги невелико, но для достижения конечной цели сушки температура поднимается в зависимости от типа получаемого солода.

Расход тепловой энергии на сушку солода, кДж, определяется по уравнению:

$$Q_{суш} = [L(I - I_0) + G_c C_c (t_2 - t_1) - W C_v t_1] / \eta,$$

где I и I_0 – энтальпия свежего и отработанного воздуха, кДж/кг, для расчета приняты $I=46,47$ кДж/кг, $I_0=86,37$ кДж/кг;

t_1 и t_2 – начальная и конечная температура солода, °С, для расчета приняты $t_1=17$ °С, $t_2=80$ °С;

G_c – масса свежесушенного солода, кг;

C_c и C_v – удельная теплоемкость высушенного солода и воды, кДж/(кг·°С), для расчета принимаем $C_c=1,42$ кДж/(кг·°С); $C_v=4,1868$ кДж/(кг·°С);

η – КПД сушилки, учитывающий потери тепла в окружающую среду, для расчета примем равным 0,8.

Выводы. Результаты расчета показали, что количество испаряемой влаги из солода, зерно которого предварительно обрабатывали неоднородным электрическим полем, меньше на 2,9%, а количество энергии на сушку такого солода меньше на 0,03 Гкал в пересчете на 1 т исходного зерна влажностью 14% по сравнению с солодом, зерно которого не подвергалось обработке. При этом механизм интенсификации процесса производства солода из пивоваренного ячменя заключается в том, что при воздействии на пивоваренный ячмень переменного неоднородного электрического поля высокой напряженности в результате высоковольтной поляризации происходит разрушение связи адсорбционных молекул воды, образуя свободную воду. Оставаясь в объеме зерна, свободная вода влияет на образование в зерне фитогормонов – гиббереллиновых кислот. Эти фитогормоны вызывают рост растения, а так же индуцируют экспрессию генов α -амилазы, последние расщепляют крахмал на моносахара, которые в дальнейшем сбраживаются.

Влажность обработанного пивоваренного ячменя неоднородным электрическим полем напряженностью 1,3 МВ/м, после 72 часов замачивания, меньше влажности контрольного ячменя на 2,9%. При этом затраты энергии на сушку светлого солода меньше на 6,8 % по сравнению с контролем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондарчук, О.В. Повышение экстрактивности солода путем обработки пивоваренного ячменя в электрическом поле : автореф. дис. ... к-та техн. наук : 05.20.02 / О. В. Бондарчук 4 БГАТУ. – Минск, 2024. – 28 с.
2. Способ обработки пивоваренного ячменя в сухом виде : пат. 22032 Респ. Беларусь, МПК С12С 1/02 О.В. Бондарчук, В.А. Пашинский, Н.Ф. Бондарь; заявитель Учреждение образования «Белорусский аграрный технический университет». – № а 20160040; заявл. 10.02.2016; опубл. 30.10.2017 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці / – 2017. – № 5. – с. 21.