

## СУШКА ПИВНОЙ ДРОБИНЫ В АЭРОВИБРОКИПЯЩЕМ СЛОЕ

**Сукманов В.А., директор института пищевых производств, д.т.н., проф., Левит И.Б., доцент кафедры общинженерных дисциплин, к.т.н., доцент, Гура А.В., ст. преподаватель кафедры общинженерных дисциплин, к.т.н.**

*(Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михайла Туган-Барановского)*

*Экспериментально исследована кинетика сушки дробины во взвешенном слое и получены кривые: изменения влагосодержания и температуры пивной дробины в процессе сушки при варьировании температуры сушильного агента; изменения влагосодержания и температуры пивной дробины в процессе сушки при варьировании нагрузки (высоты шара); изменения влагосодержания и температуры пивной дробины в процессе сушки при варьировании скорости сушильного агента; изменения влагосодержания и температуры пивной дробины в процессе сушки при варьировании параметров вибрации решета; скорости сушки пивной дробины. Получена обобщающая кривая сушки пивной дробины при разных режимах процесса. Показана постоянность произведения скорости и времени сушки  $N\tau$ , что упрощает расчеты смены влагосодержания в определенные периоды тепловой обработки продукта.*

**Постановка проблемы.** На пивоваренных заводах Украины в настоящее время образуется большое количество различных отходов, среди которых основную массу составляет пивная дробина. Этот «побочный» продукт в сыром состоянии имеет большой спрос у животноводов как высококалорийная белковая добавка. Отходы пивоварения обращают на себя внимание как на источник сырья с высокой пищевой ценностью и биологической активностью, используемое для откорма скота и птицы. На пивоваренном заводе средней мощности идет в отходы 35000 тонн пивной дробины ежегодно, а эффективных методов консервирования этой продукции не существует, кроме сушки, но и сушку дробины в Украине не применяют из-за отсутствия оборудования.

Сушка пивной дробины до окончательной влажности 10% обеспечивает длительный срок хранения, что делает рентабельным ее производство и транспортировку на большие расстояния. Твердый остаток можно использовать для получения целой гаммы ценных продуктов, поскольку он содержит в своем составе около 8% липидов, 26% белка, 58% углеводов, а также минералов, витаминов и других биологически активных веществ.

В условиях современных технологий тепловой переработки высоковлажных материалов (дробина содержит свыше 80% влаги) и относительно отсталой техники, возникает необходимость разработки современных высокотехнологичных и низкоэнергоемких процессов сушки пивной

**Целью работы** является исследование сушки пивной дробины в аэровиброкипящем слое. Объектом исследования является процесс сушки пивной дробины и предметом исследования – пивная дробина в аэровиброкипящем слое.

**Результаты исследований.** При моделировании псевдооживленного слоя пивной дробины при ее сушке исходили из того, что сушка происходит на перфорированной решетке, которая продувается горячим воздухом и в аппарате создается псевдооживленный слой и поток воздуха при прохождении решетки имеет ламинарный характер.

Слой дробины был представлен в виде пористого тела с крупными, случайно расположенными включениями, обладающими изотропными свойствами  $k_x = k_y = k$ , и методами конечно-элементного моделирования получено распределение скорости протекания воздуха внутри слоя дробины.

Дифференциальное уравнение переноса теплоты в дробине описано уравнением

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = A \nabla^2 T + \frac{r}{c_{3в}} \varepsilon \frac{\partial u}{\partial \tau} . \quad (1)$$

Время прогревания слоя дробины толщиной  $H$  определяется выражением

$$T(y, \tau) = \frac{T_0}{2\sqrt{\pi A \tau}} \int_0^{H/2} e^{-\frac{(\alpha-y)^2}{4A\tau}} d\alpha. \quad (2)$$

Количество теплоты, передаваемое конвекцией, расходуется на нагревание дробины и влаги, которая в ней держится, за время  $d\tau$  и

на испарение массы влаги  $dm_{\text{вол}}$  за тот же промежуток времени

$$\frac{dm_{\text{вол}}}{d\tau} = \frac{\alpha}{r}(1-P)(T_c - T_u)F - (c_{\text{с.вещ.}} \cdot m_{\text{с.вещ.}} + c_{\text{вл.}} \cdot m_{\text{вл.}}) \frac{1}{r} \frac{dT}{d\tau} + \frac{\alpha_1}{r} P(T_c - T_u)F, \quad (3)$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи;  $P$  - пористость слоя дробины;  $T_c, T_u$  - температуры сушки и испарения, соответственно;  $F$  - площадь поверхности продукта;  $c_{\text{с.вещ.}}, m_{\text{с.вещ.}}, c_{\text{вл.}}, m_{\text{вл.}}$  - удельная теплоемкость и масса сухого вещества и влаги соответственно.

Для расчета скорости сушки и получения нестационарного поля влагосодержания в процессе сушки дробины было решено дифференциальное уравнение второго порядка

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a_m \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \quad (4)$$

где  $a_m$  - коэффициент теплопроводности влагопереноса (коэффициент диффузии).

Уравнение (5) с соответствующими начальными и предельными условиями и при массообменном критерии Фурье

$$F_{0m} = \frac{a_m t}{R^2} > 0,5 \text{ имеет вид}$$

$$u = u_1 - \frac{q_m}{R\rho_0} \left( t - \frac{R^2 - 3x^2}{6a_m} \right), \quad (5)$$

где  $R$  - половина толщины слоя;  $u$  - начальное значение влагосодержания.

Для решения нестационарной задачи (4) выполнено моделирование в системе *ANSYS*. При моделировании процесса обезвоживания отдельного зерна пивной дробины, расчета скорости сушки зерна дробины и получения нестационарного поля влагосодержания в процессе сушки было решено дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a_m \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

Экспериментальная установка для сушки пивной дробины оборудована тепловыми, механическими, регулирующими,

измерительными и регистрирующими приборами (Рис. 1).

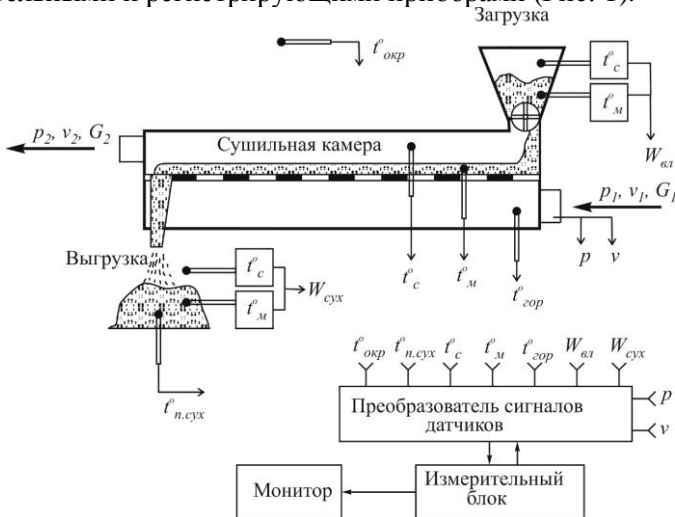


Рис. 1. Измерительная схема экспериментальной сушилки:  $t_{окр}^0$  – температура окружающей среды;  $t_{гор}^0$  – температура горячего воздуха;  $t_{п.сух}^0$  – температура сухого продукта;  $t_c^0$  – температура среды над продуктом;  $t_m^0$  – температура в слое продукта;  $W_{вл}$  – влажность сырой дробины;  $W_{сух}$  – влажность сухой дробины;  $p$  – давление горячего воздуха;  $v$  – скорость горячего воздуха.

С целью определения основных характеристик процесса сушки пивной дробины, был реализован дробный факторный эксперимент, реализующим часть (дробную реплику) от полного факторного эксперимента типа  $2^{4-1}$ . План задан генерирующим соотношением  $x_4 = x_1 x_2 x_3$ . Определяющим контрастом является соотношение  $1 = x_1 x_2 x_3 x_4$ . При этом уравнение регрессии имеет вид

$$y = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_p x_p.$$

Здесь  $y$  – вектор выходов - влажность дробины;  $x_1, x_2, x_3, x_4$  – векторы входных параметров:  $x_1$  – температура сушильного агента (воздуха);  $x_2$  – нагрузка решета (высота слоя продукта);  $x_3$  – скорость сушильного агента;  $x_4$  – параметры вибрации решета (частота и амплитуда).

План реализован поэтапным определением выходной величины.

Этап 1:  $y^{(1)} = f(\tau)$  при  $x_1 = 50 \text{ }^\circ\text{C}; 60 \text{ }^\circ\text{C}; 70 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $x_2, x_3, x_4 = \text{const}$ .

Этап 2:  $y^{(2)} = f(\tau)$  при  $x_2 = 20; 30; 40 \text{ мм}$ ;  $x_1, x_3, x_4 = \text{const}$ .

Этап 3:  $y^{(3)} = f(\tau)$  при  $x_3 = 2,5; 3,0; 3,5 \text{ м/с}$ ;  $x_1, x_2, x_4 = \text{const}$ .

Этап 4:  $y^{(4)} = f(\tau)$  при  $x_4 = 10/10; 13.5/7; 17/4$  Гц/мм;  $x_1, x_2, x_3 = \text{const}$ .

На основе экспериментального высушивания дробины до постоянной массы в условиях трехкратного повторения опытов и совпадения их результатов в пределах погрешности эксперимента, были получены кривые сушки и кривые скорости сушки при варьировании температуры сушильного агента, нагрузки на решето (начальной высоты слоя), скорости сушильного агента и параметров вибрации.

На рисунке 2 приведены графические зависимости кинетики изменения влажности в процессе сушки пивной дробины  $W = f(\tau)$ . Кривые содержат явно выраженный прямой участок от начала сушки до точки  $K_1$ . В этом периоде процесс сушки проходит с постоянной скоростью и аналогичен процессу испарения жидкости со свободной поверхности. Аналогичные зависимости были получены для каждого из 4-х рассматриваемых этапов сушки.

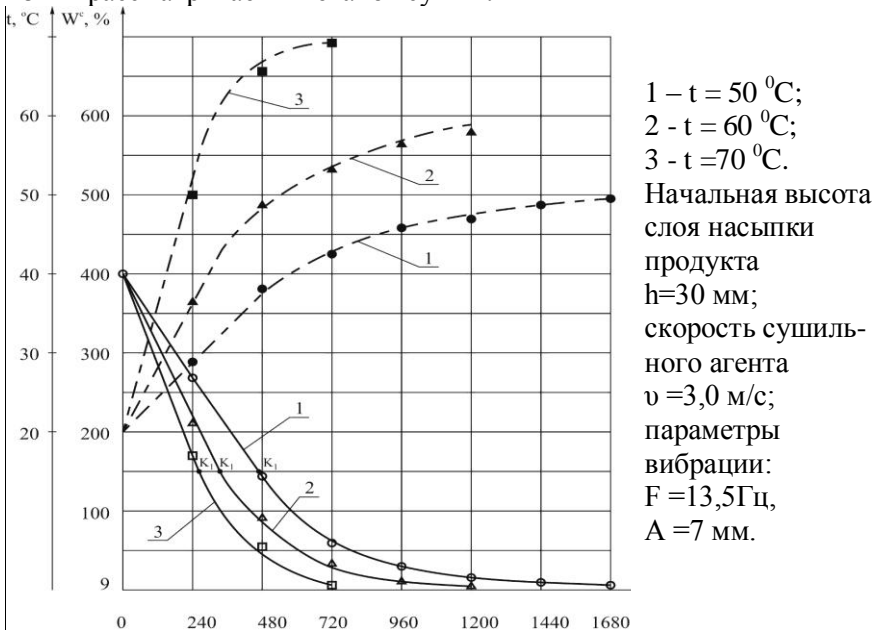
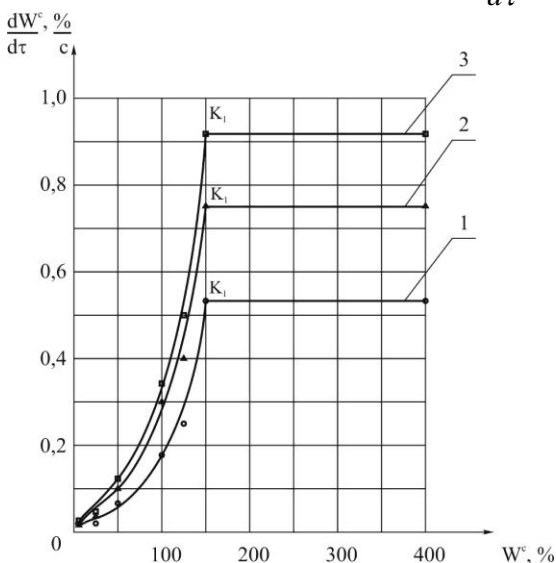


Рис. 2. Кривые изменения влагосодержания и температуры пивной дробины в процессе сушки при варьировании температуры сушильного агента

Полученные кривые позволяют определить время сушки и

текущее влагосодержание продукта, но не выбрать рациональный режим, так как отсутствует критерий выбора. В связи с этим, в работе предложены относительный коэффициент энергопотребления; коэффициент пропорциональности по производительности и высоте слоя; показатель условного расхода электроэнергии, которые позволяют обоснованно выбирать рациональные режимы процесса сушки пивной дробины.

С целью дальнейшего анализа кинетики сушки дробины осуществлено графическое дифференцирование кривых сушки и построены графики скорости сушки  $\frac{dW^c}{d\tau} = f(W)$  (Рис. 3).



1 -  $t = 50$  °C; 2 -  $t = 60$  °C; 3 -  $t = 70$  °C.

Начальная высота слоя насыпки продукта  $h = 30$  мм; скорость сушильного агента  $v = 3,0$  м/с; параметры вибрации:  $F = 13,5$  Гц,  $A = 7$  мм.

Рис. 3. Кривые скорости сушки дробины, полученные графическим дифференцированием

Кривые 1, 2, 3 (Рис 3) при сушке дробины в псевдооживленном состоянии имеют горизонтальные участки постоянной скорости процесса, соответствующие интенсивной сушке и наклонные кривые падающей скорости: более высокой температуре сушильного агента соответствует большая скорость сушки в первый период протекания процесса. При достижении критической точки  $K_1$  скорость начинает падать, а кривые всех опытов сближаются и асимптотически приближаются к значению равновесного состояния. Кривые скорости сушки дробины 2-го этапа исследований (варьирование

высоты слоя продукта) практически не отличаются интенсивностью процесса от приведенных выше: более тонкий слой продукта высыхает с большей скоростью.

Совмещение кривых сушки пивной дробины, полученных в двух рассматриваемых режимах, в одну обобщенную кривую, описываемую уравнением (6) по методу В. Красникова доказывает постоянство произведения скорости и времени сушки  $N\tau$  и упрощает расчеты изменения влагосодержания как в первый так и во второй периоды тепловой обработки продукта.

$$Y = 393,297 - 1,236X + 0,001X^2 - 4,330 \times 107X^3 \quad (6)$$

Для оценки влияния процесса сушки пивной дробины на ее качественные показатели был проведен анализ химического состава пивной дробины, содержание в ней основных микроэлементов, а также аминокислотный состав влажной пивной дробины и сухой. Сушка производилась при температуре сушильного агента  $t = 60^{\circ}\text{C}$ ; скорости сушильного агента  $v = 3,0$  м/с; параметрах вибрации:  $F = 13,5$  Гц,  $A = 7$  мм.

**Выводы.** Сравнительный анализ полученных результатов показал, что сушка пивной дробины с использованием принятых параметров процесса не ухудшает качественных показателей получаемого продукта, так как исследуемые показатели, при пересчете на сухое вещество, практически не изменяются.

### Список литературы

1. Сукманов В.О. Використання програмного комплексу комп'ютерного моделювання *ANSYS* під час визначення параметрів сушіння пивної дробини. Сукманов В.О., Русланов Г.І., Лаврінченко Н.М., Гура О.В. // Вісник ДонДУЕТ. – 2006. - №1 (29). – С. 87-103.
2. Лаврінченко Н.М. Моделювання процесу дифузії твердих частинок у псевдо зрідженому шарі. / Н.М. Лаврінченко, О.В. Гура.// Обладнання та технології харчових виробництв: Темат. Зб.наук. праць. – Донецьк, ДонДУЕТ, 2006. – Вип. 14. – С.144-150.
3. Лаврінченко Н.М. Моделювання псевдозрідженого шару пивної дробини при її сушінні / Н.М. Лаврінченко, В.О. Сукманов, Г.І. Русланов, О.В. Гура. // Обладнання та технології харчових виробництв : темат. зб. наук. пр. / Донец. держ. ун-т економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського. – Донецьк, 2007. – Вип. 17, т. 2. – С. 69-79.

## СУШКА ПИВНОЇ ДРОБИНИ В АЕРОВІБРОКИП'ЯЧОМУ ШАРІ

*Експериментально досліджена кінетика сушки дробини в зваженому шарі й отримані криві: зміни вологовмісту і температури пивної дробини в процесі сушки при варіюванні температури сушильного агента; зміни вологовмісту і температури пивної дробини в процесі сушки при варіюванні навантаження (висоти шару); зміни вологовмісту і температури пивної дробини в процесі сушки при варіюванні швидкості сушильного агента; зміни вологовмісту і температури пивної дробини в процесі сушки при варіюванні параметрів вібрації решета; швидкості сушки пивної дробини. Отримана узагальнена крива сушки пивної дробини при різних режимах процесу. Показана постійність добутку швидкості і часу сушки  $Nt$ , що спрощує розрахунки зміни вологовмісту в певні періоди теплової обробки продукту*

### **DRYING OF THE BEER PELLET IN THE LAYER**

*The behaviour of pellet particles in a weighed layer has been experimentally investigated; there have been obtained pseudo-fluidization curves for beer pellet at different product thickness, kinetics of pellet drying in a weighed layer and dependences of moisture content changes and beer pellet temperatures in the course of drying under variable temperature range of a drying agent, layer thickness, drying agent velocity, sieve vibration parameters, speed of beer pellet drying. There has been received a generalized curve of beer pellet drying under various process conditions.*