

ПРОЦЕССЫ, АППАРАТЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

УДК 664.8.047

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СУШКИ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ ДРОЖЖЕЙ И ХЛЕБА ПО ОБОБЩЕННЫМ ПЕРЕМЕННЫМ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА

А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, А. М. Гусаров

Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследование направлено на повышение эффективности сушки хлебопекарных дрожжей и хлеба на сухари. Предложено применить для сушки метод кипящего слоя, однако известные методики расчета ее продолжительности в данном случае не обеспечивают необходимой точности прогноза. Научная задача – оценка точности методики расчета продолжительности сушки в кипящем слое по обобщенным переменным, характеризующим кинетику процесса.

Материалы и методы. Эксперимент проводили на лабораторной установке для сушки в кипящем слое. Использовали прессованные хлебопекарные дрожжи и свежеспеченный хлеб из пшеничной муки в соответствии с ТУ ВУ 690655013.003-2017. Продолжительность сушки устанавливалась по конечной влажности продукта. Для расчета продолжительности использовали однозонный метод А. В. Лыкова и метод, основанный на обобщенной кривой кинетики сушки.

Результаты. Получено 6 уравнений, описывающих зависимость продолжительности сушки в кипящем слое дрожжей и хлеба от влажности и температуры продукта, положенные в основу разработанной методики расчета продолжительности. В результате сравнительной оценки методик расчета продолжительности установлена высокая точность методики по обобщенным переменным. Существенно, на 20–30 %, при этом сокращается объем расчетной работы.

Выводы. Сушка дрожжей и пшеничного хлеба в кипящем слое относительно более эффективна, способствует сохранению свойств продукта, учитывая тот факт, что дрожжи представляют собой живые микроорганизмы. Метод обработки опытных данных обобщенными переменными для процессов сушки хлебопекарных дрожжей и хлеба на сухари применен впервые. Разработанная методика для расчета продолжительности применима в инженерных расчетах для конструирования и управления процессом на производстве.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *хлебопекарные дрожжи; хлеб; относительная скорость сушки; влагосодержание; коэффициент сушки; скорость сушки; обобщенное время сушки; температура.*

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ольшанский, А. И. Методика расчета продолжительности сушки в кипящем слое дрожжей и хлеба по обобщенным переменным кинетики процесса / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, А. М. Гусаров // Вестник Белорусского государственного университета пищевых и химических технологий. – 2021. – № 2(31). – С. 91–102.

METHOD FOR CALCULATING TIME OF FLUIDIZED BED DRYING OF YEAST AND BREAD BY GENERALIZED VARIABLES OF THE KINETICS OF THE PROCESS

A. I. Ol'shanskii, S. V. Zhernosek, A. M. Gusarov

Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus

ABSTRACT

Introduction. The study aims to increase the efficiency of drying bakery yeast and bread for making rusks by means of fluidized bed drying. However, methods available for calculating drying time do not provide the necessary accurate data. The scientific task is to assess the accuracy of the method for calculating the drying time in a fluidized bed using generalized variables characterizing the kinetics of the process.

Materials and methods. The experiment was carried out in a laboratory fluidized bed dryer. Pressed bakery yeasts and freshly baked wheat bread were used in accordance with TU BY 690655013.003-2017. The drying time was set according to the final moisture content of the product. Single-zone method developed by A. V. Lykov and the method based on the generalized curve of drying kinetics were used for time calculation.

Results. There were developed six equations that describe the dependence of drying time of yeast and bread in a fluidized bed on the moisture content and temperature of the product. They formed the basis of the method for calculating time of drying. Generalized variables method was found out to show high accuracy as compared to the other methods for time calculating. Calculation work was reduced by 20–30 %.

Conclusions.

Fluidized bed drying is an effective method for yeast and wheat bread drying. It helps to preserve product quality taking into account the fact that yeast is a living microorganism. The method of processing experimental data with generalized variables for drying bakery yeast and bread for making rusks was firstly applied in practice. The developed methodology for calculating time can be introduced into engineering calculations for the design and control of production process.

KEY WORDS: *bakery yeast; bread; relative drying rate; moisture content; drying coefficient; drying speed; generalized drying time; temperature.*

FOR CITATION: Ol'shanskii, A. I. Method for calculating time of fluidized bed drying of yeast and bread by generalized variables of the kinetics of the process / A. I. Ol'shanskii, S. V. Zhernosek, A. M. Gusarov // Vestnik of the Belarusian State University of Food and Chemical Technologies. – 2021. – № 2(31). – P. 91–102 (in Russian).

ВВЕДЕНИЕ

Известные исследования сушки продуктов в кипящем слое преимущественно посвящены изучению гидродинамики и теплообмена в слое [1–22]. Целью работы является разработка универсального метода расчета длительности сушки для аппаратов кипящего слоя. Длительность сушки в кипящем слое не устанавливалась и рассматривалась по конечной влажности продукта в слое [1–5, 7]. Для определения длительности сушки хлеба на сухари применялся однозональный метод расчета А. В. Лыкова [23, 24]. Кривая скорости сушки хлеба с минимальной погрешностью аппроксимировалась прямой линией в точках начального и равновесного влагосодержания [23]. Все известные приближенные методы расчета длительности сушки содержат от трех до четырех коэффициентов, определяемых экспериментально, что усложняет обработку опытных данных [23, 24].

Выработка сухих дрожжей и сушка хлеба на сухари имеет исключительно важное значение для пищевой промышленности и является одним из наиболее распространенных методов их хранения и консервирования. Обычно вырабатываются прессованные дрожжи, которые являются быстропортящимся продуктом, поэтому дрожжи подвергаются сушке и затем могут храниться длительное время. Сушка хлебопекарных дрожжей представляет значительные трудности, поскольку необходимо сохранять живые дрожжевые клетки. Поэтому сушка дрожжей проводится при мягких режимах [1–4]. Хлеб, как объект сушки, представляет собой сложную систему, состоящую в основном из крахмала и белков. И такая система быстро черствеет. В то же время такая система, как хлебный сухарь пригодна для длительного хра-

нения. Сухарный хлеб, как правило, выпекается в формах. Режимы сушки хлеба на сухари должны обеспечивать достаточно равномерную сушку по всему объему ломтей хлеба для исключения значительной усадки [1, 6]. Сушка хлеба на сухари в сушильных камерах может проводиться при отсутствии воздухообмена или максимальном воздухообмене с полностью открытыми вытяжными клапанами и приоткрытых дверцах в сушильной камере, что создает свободную циркуляцию воздуха со скоростью $v \approx 0,3 - 0,6$ м/с [1, 6].

Продолжительность сушки продуктов можно получить из решения системы дифференциальных уравнений тепловлагопереноса при известных значениях коэффициентов переноса [22, 23].

Однако, сушка нестационарный процесс, в котором коэффициенты переноса находятся в сложной зависимости от влагосодержания и температуры [25]. Поэтому важной практической задачей является разработка надежных, приближенных уравнений для расчета кривых сушки с минимальным числом постоянных, определяемых опытным путем.

Известно много экспериментальных методов обработки данных с выводом уравнений для вычисления времени сушки [1, 23, 24]. Г. К. Филоненко [26] впервые в практику сушки предложен метод построения обобщенной кривой сушки. В координатах $\bar{u} = f(N\tau)$ для материалов с одинаковым начальным влагосодержанием \bar{u}_0 все кривые сушки при всех режимах сводятся в одну обобщенную кривую по величине $N\tau$, где N – скорость сушки в первом периоде.

Переменная $N\tau$ является устойчивым комплексом величин, характерных для процесса сушки, и в соответствии с теорией подобия названа обобщенным временем сушки [24]. В результате анализа большого объема экспериментальных данных по кинетике сушки различных материалов разными способами сушки В. В. Красниковым [24] установлено, что при сушке любого конкретного материала при постоянном начальном влагосодержании произведение $N\tau$ не зависит от режима сушки и сохраняется неизменной $N\tau$ и, следовательно,

$$N_1\tau_1 = N_2\tau_2 = N_n\tau_n = \text{const},$$

где N_1, N_2, N_n – скорости сушки в первых периодах.

Из обобщенной кривой сушки следует, что можно построить обобщенную кривую скорости:

$$N^* = f(\bar{u}, N\tau),$$

где $N^* = \frac{1}{N} \left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right|$ – относительная скорость сушки, зависящая только от влагосодержания, и от режима сушки не зависит.

Обобщенная кривая сушки позволяет предложить еще один метод обобщения кривых для каждого влагосодержания \bar{u}_0 [24]:

$$\left(\frac{\tau_{II}}{\tau_I} \right)_1 = \left(\frac{\tau_{II}}{\tau_I} \right)_2 = \left(\frac{\tau_{II}}{\tau_I} \right)_n = \text{const}.$$

Из метода обобщенных кривых сушки и кривых скорости следует, что обобщенное время $N\tau$ и относительная скорость сушки N^* являются функциями только влагосодержания \bar{u} , и следовательно, можно записать: $N\tau = f(\bar{u})$, $N^* = f(\bar{u})$, $N^* = f(N\tau)$,

$$N^* = f(\tau_{II} / \tau_I).$$

Отношение τ_{II} / τ_I представляет собой, как и величина $N\tau$, обобщенную переменную. Приближенные методы, основанные на обобщенных кривых кинетики сушки, позволяют оценить общие закономерности процесса при изменении режимов сушки хлебопекарных дрожжей и хлеба на сухари.

Цель исследования – повышение эффективности сушки хлебопекарных дрожжей и пшеничного хлеба и управляемости процессом сушки.

Научная задача – оценка точности методики расчета продолжительности сушки в кипящем слое дрожжей и хлеба по обобщенным переменным, характеризующим кинетику процесса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эксперимент проводили на лабораторной установке для сушки в кипящем слое. Использовали прессованные хлебопекарные дрожжи и свежеспеченный хлеб из пшеничной муки в соответствии с ТУ ВУ 690655013.003-2017. Продолжительность сушки устанавливалась по конечной влажности продукта. Для расчета продолжительности использовали однозональный метод А. В. Лыкова и метод, основанный на обобщенной кривой кинетики сушки.

Первичный материал для обработки опытных данных в виде кривых сушки заимствован из [5, 6].

Скорость сушки $d\bar{u} / d\tau$ для периода подающей скорости определяется уравнением [4, 6, 7].

$$\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = K (\bar{u} - u_p), \quad (1)$$

где K – коэффициент сушки [23].

$$K = \frac{N}{\bar{u}_{кр} - u_p}, \quad (2)$$

где $\bar{u}_{кр}$, u_p – критическое и равновесное влагосодержание материала.

Подставляя в относительную скорость сушки N^* уравнения (1) и (2), получим приближенное уравнение для N^* :

$$N^* \approx \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p}. \quad (3)$$

Для материалов, сушка которых протекает только в периоде падающей скорости, величина N^* равна

$$N^* \approx \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_0 - u_p}.$$

Поскольку кривые сушки во втором периоде представляют собой экспоненциальные зависимости, то целесообразно искать зависимости: $N^* = f(N\tau)$ и $N^* = f(\tau_{II}/\tau_I)$ в виде

$$N^* = \frac{1}{N} \left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = \exp(-aN\tau_{II}); \quad (4)$$

$$N^* = \frac{1}{N} \left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = \exp(-m \frac{\tau_{II}}{\tau_I}). \quad (5)$$

Авторами, по результатам обработки экспериментальных данных по сушке 13 различных влажных материалов при различных способах сушки, получены уравнения для определения длительности сушки по зависимостям (4) и (5) [27].

Сравнительный анализ полученных приближенных уравнений по вычисленным значениям длительности сушки показал их полную адекватность экспериментальным кривым сушки с погрешностью в границах точности обработки эксперимента (5–6 %). Интегрированием (4) в заданных пределах для сушки во втором периоде получим:

$$\int_{\bar{u}}^{\bar{u}_{кр}} d\bar{u} = N \int_0^{\tau} \exp(-aN\tau) d\tau_{II};$$

$$\tau_{II} = -\frac{1}{aN} \ln \left[1 - a(\bar{u}_{кр} - \bar{u}) \right]. \quad (6)$$

С учетом времени сушки в первом периоде $\tau_I = (\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}) / N$ общая длительность сушки равна:

$$\tau = \frac{1}{N} \left[(\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}) - \frac{1}{a} \ln \left(1 - a(\bar{u}_{кр} - \bar{u}) \right) \right]. \quad (7)$$

Обработкой значительного числа экспериментов по сушке более чем 13 наименований материалов, получена зависимость для определения константы a в уравнении (4) [27, 28].

$$a = 0.8 / \bar{u}_{кр}.$$

Уравнение (5) для второго периода сушки запишем в виде

$$\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = N \exp \left(-m \frac{\tau_{II}}{\tau_I} \right). \quad (8)$$

Интегрированием уравнения (8) получим

$$-(\bar{u}_{кр} - \bar{u}) = N \frac{\tau_I}{m} \left[\exp \left(\frac{m}{\tau_I} \tau_{II} - 1 \right) \right].$$

После простых преобразований, с учетом времени сушки в первом периоде, получим общее время процесса сушки

$$\tau = \tau_I + \tau_{II} = \frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}}{N} \left\{ 1 - \frac{1}{m} \ln \left[1 - \left(\frac{\bar{u}_{кр} - \bar{u}}{\bar{u}_0 - \bar{u}_p} \right) m \right] \right\}. \quad (9)$$

Постоянная m в уравнении (5) оказалась линейной функцией отношения влагосодержания $\bar{u}_0 / \bar{u}_{кр}$ и приближенно определяется выражением [13]:

$$m \approx 0,505 \bar{u}_0 / \bar{u}_{кр}.$$

Уравнения (7) и (9) для материалов, сушка которых протекает с периодом постоянной скорости сушки N , можно получить и не прибегая к интегрированию уравнений (4) и (5). Запишем:

$$N^* = \frac{\bar{u} - \bar{u}_{кр}}{\bar{u}_{кр} - u_p} = \exp(-aN \tau_{II}); \quad (10)$$

$$N^* = \frac{\bar{u} - \bar{u}_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} = \exp(-m \frac{\tau_{II}}{\tau_I}). \quad (11)$$

Из решений (10) и (11) с учетом времени сушки в первом периоде получим:

$$\tau = \frac{1}{N} \left[(\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}) - \left(\frac{1}{a} \ln \frac{\bar{u} - \bar{u}_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} \right) \right]; \quad (12)$$

$$\tau = \frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}}{N} \left(1 - \frac{1}{m} \ln \frac{\bar{u} - \bar{u}_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} \right). \quad (13)$$

Сушка хлеба на сухари при начальных влагосодержаниях $\bar{u}_0 = 0,8 - 0,95$ протекает при всех режимах в периоде падающей скорости без периода постоянной температуры на уровне температуры мокрого термометра $t_{\text{м.т.}}$. В этом случае значения $\bar{u}_{\text{кр}}$ и N заменяется в уравнениях (12), (13) на \bar{u}_0 и $(d\bar{u} / d\tau)_{\text{макс}}$. Постоянная a определяется из зависимости $a = 0.8 / \bar{u}_0$.

Уравнения (12) и (13) для сушки хлеба на сухари имеют вид:

$$\tau = \frac{1}{(d\bar{u} / d\tau)_{\text{макс}}} \left(-\frac{1}{a} \ln \frac{\bar{u} - \bar{u}_p}{\bar{u}_0 - \bar{u}_p} \right); \quad (14)$$

$$\tau = -\frac{1}{m_0} \left[\frac{m_0}{(d\bar{u} / d\tau)_{\text{макс}}} \ln \frac{\bar{u} - \bar{u}_p}{\bar{u}_0 - \bar{u}_p} \right]. \quad (15)$$

Длительность сушки для материалов, сушка которых протекает только в периоде падающей скорости из уравнения (6), равна

$$\tau = -\frac{1}{a(d\bar{u} / d\tau)_{\text{макс}}} \ln [1 - a(\bar{u}_0 - \bar{u})]. \quad (16)$$

Уравнение (5) для сушки в периоде только падающей скорости запишется в виде

$$N^* = \exp(-m_0\tau), \quad (17)$$

где τ – время сушки от начального влагосодержания \bar{u}_0 .

Из уравнения (17) следует, что при сушке материалов только в периоде падающей скорости коэффициент m_0 имеет размерность $[c^{-1}; \text{мин}^{-1}; \text{ч}^{-1}]$. Обработкой экспериментальных данных по сушке хлеба на сухари при температурах $t_c = 90^\circ C; 120^\circ C$ и $\bar{u}_0 = 0,8 - 0,95$ получена приближенная зависимость для коэффициента m_0 в уравнении (17).

$$m_0 \approx 7(d\bar{u} / d\tau)_{\text{макс}} \exp(-2\bar{u}_0). \quad (18)$$

Длительность сушки определяется интегрированным уравнением (17) [27].

$$\tau = \frac{1}{m_0} \ln \left[1 - \frac{(\bar{u}_0 - \bar{u})m_0}{(d\bar{u} / d\tau)_{\text{макс}}} \right]. \quad (19)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис.1 и 2 приведены кривые сушки $\bar{u} = f(\tau)$ и температурные кривые $\bar{t} = f(\tau)$, $\bar{t} = f(\bar{u})$ для комбинированной сушки пекарских дрожжей и конвективной сушки ломтей хлеба на сухари при различных режимах. На рис. 1 (b) даны результаты обработки кривых сушки пекарских дрожжей в виде зависимости $-\lg N^* = f(N\tau_{\text{II}})$ и $-\lg N^* = f(\tau_{\text{II}} / \tau_1)$, из которых следует, что такие зависимости в данной системе координат является экспонентами. Такая обработка опытных данных проведена и для процессов сушки хлеба на сухари.

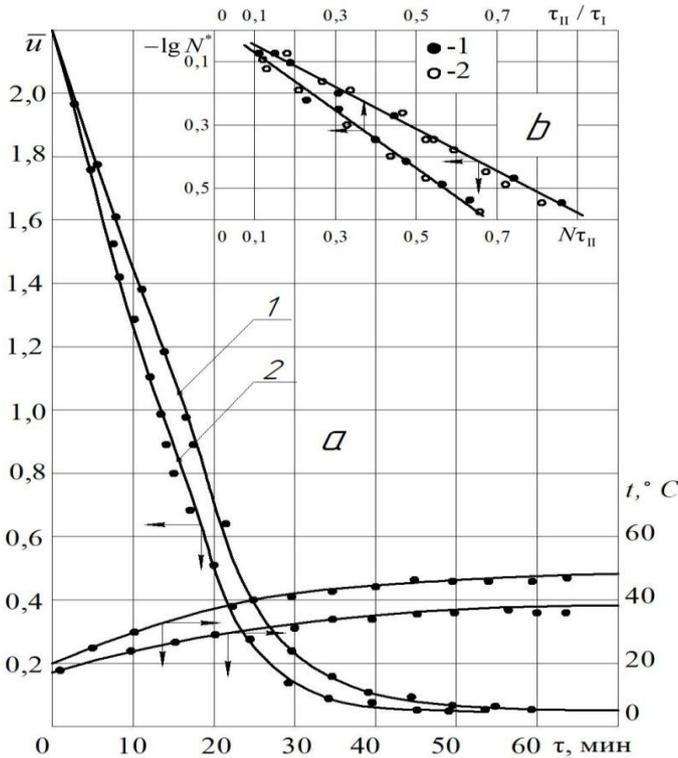


Рис. 1. *a* – Кривые сушки $\bar{u} = f(\tau)$ и температурные кривые $\bar{t} = f(\tau)$ в процессе комбинированной сушки пекарских дрожжей при режимах сушки: 1 – $t_c = 40^\circ C$; 2 – 50; скорость воздуха $v = 2,9 \text{ м/с}$; относительная влажность воздуха $\phi = 24\%$; *b* – зависимости относительной скорости сушки от обобщенного времени сушки и безразмерного времени сушки $-\lg N^* = f(N\tau_{II})$ и $-\lg N^* = f(\tau_{II} / \tau_I)$; 1 – режим 1; 2 – режим 2

Fig. 1. *a* – Drying curves $\bar{u} = f(\tau)$ and temperature curves $\bar{t} = f(\tau)$ in the process of combined drying of bakery yeast in drying modes: 1 – $t_c = 40^\circ C$; 2 – 50; air velocity $v = 2,9 \text{ m/s}$; relative air humidity $\phi = 24\%$; *b* – dependence of relative drying speed on generalized drying time and dimensionless drying time $-\lg N^* = f(N\tau_{II})$ and $-\lg N^* = f(\tau_{II} / \tau_I)$; 1 – mode 1; 2 – mode 2

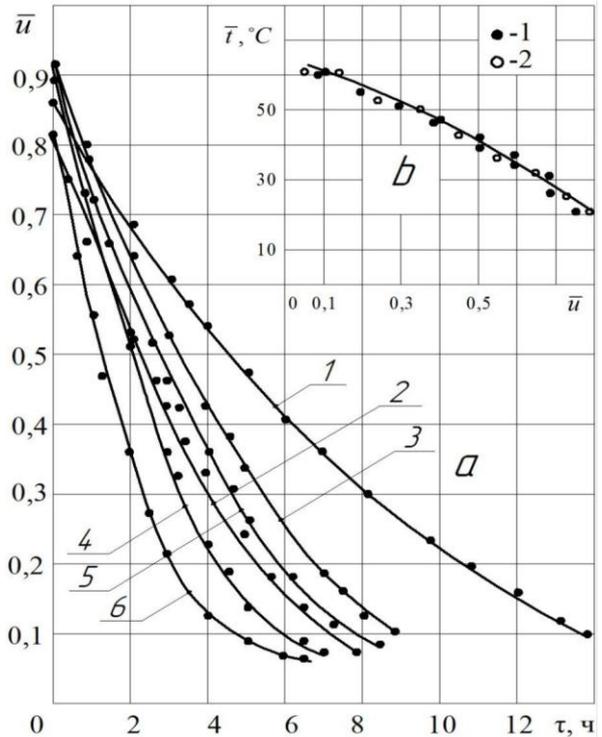


Рис. 2. *a* – Кривые сушки $\bar{u} = f(\tau)$ в процессе конвективной сушки ломтей хлеба на сухари: 1 – $t_c = 90^\circ C$; 2 – 120 (сушка хлеба в кассетах); 3 – 90; 4 – 120 (сушка хлеба на листе); 5 – 90; 6 – 120 (сушка хлеба на поду); *b* – температурные кривые $\bar{t} = f(\bar{u})$ в процессе конвективной сушки ломтей хлеба для режимов сушки: 1 – $t_c = 64^\circ C$; $v = 1,85 \text{ м/с}$; $\phi = 29\%$; 2 – $t_c = 64^\circ C$; $v = 2,5 \text{ м/с}$; $\phi = 22\%$

Fig. 2. *a* – Drying curves $\bar{u} = f(\tau)$ in the process of convective drying of bread slices for making rusks: 1 – $t_c = 90^\circ C$; 2 – 120 (drying bread in cassettes); 3 – 90; 4 – 120 (drying bread on a sheet); 5 – 90; 6 – 120 (drying bread on hearth); *b* – temperature curves $\bar{t} = f(\bar{u})$ during convective drying of bread slices for drying modes: 1 – $t_c = 64^\circ C$; $v = 1,85 \text{ m/s}$; $\phi = 29\%$; 2 – $t_c = 64^\circ C$; $v = 2,5 \text{ m/s}$; $\phi = 22\%$

В табл. 1–3 даны результаты расчета длительности сушки пекарских дрожжей и хлеба на сухари и сопоставление этих значений с экспериментом.

Табл. 1. Сопоставление расчетных значений длительности сушки с экспериментом в процессе комбинированной сушки пекарских дрожжей по формулам (7), (9), (12), (13)

Table 1. Comparison of calculated values of drying time with the experimental ones in the process of combined drying of bakery yeast by formulae (7), (9), (12), (13)

Пекарские дрожжи											
Режим сушки 1: $t_c = 40^\circ C$; $v = 2,9 \text{ м/с}$; $\varphi = 24\%$; $\bar{u}_0 = 2,2$; $\bar{u}_{кр} = 0,9$; $N = 0,078 \text{ мин}^{-1}$; $\tau_1 = 17,5 \text{ мин}$; $u_p = 0,1$; $t_{м.т.} = 24^\circ C$						Режим сушки 2: $t_c = 50^\circ C$; $v = 2,9 \text{ м/с}$; $\varphi = 24\%$; $\bar{u}_0 = 2,2$; $\bar{u}_{кр} = 0,8$; $N = 0,106 \text{ мин}^{-1}$; $\tau_1 = 13 \text{ мин}$; $u_p = 0,1$; $t_{м.т.} = 36^\circ C$					
\bar{u}	τ , мин экс.	τ , мин (7)	τ , мин (9)	τ , мин (12)	τ , мин (13)	\bar{u}	τ , мин экс.	τ , мин (7)	τ , мин (9)	τ , мин (12)	τ , мин (13)
0,8	19,5	19,6	19,2	18,9	18,7	0,7	14,0	14,2	13,7	14,4	14,5
0,6	21,5	20,8	21,7	22,4	29,2	0,5	17,5	16,2	16,8	17,6	17,5
0,4	26,0	25,3	25,0	27,2	27,4	0,4	19,0	18,5	18,2	19,2	19,6
0,3	28,5	27,5	27,9	30,4	31,4	0,3	21,5	20,4	20,8	22,3	22,4
0,2	31,5	29,8	31,5	33,5	33,8	0,2	24,0	22,9	23,5	25,0	25,7

Табл. 2. Сравнение расчетных значений длительности сушки с экспериментом в процессе конвективной сушки ломтей хлеба в кассетах и на листе по формулам (14), (15), (16), (19), (23)

Table 2. Comparison of calculated values of drying time with the experimental ones in the process of convective drying of bread slices in cassettes and on a sheet by formulae (14), (15), (16), (19), (23)

Сушка ломтей хлеба в кассетах, толщина ломтей хлеба – 23 мм							Сушка ломтей хлеба на листе, толщина ломтей – 23 мм						
Режим сушки 1: $t_c = 90^\circ C$; $v = 0,2 - 0,4 \text{ м/с}$ (свободный воздухообмен); $\varphi = 10\%$; $m_0 = 0,14 \text{ ч}^{-1}$; $\bar{u}_0 = 0,878$; $(d\bar{u}/d\tau)_{\text{макс}} = 0,13 \text{ ч}^{-1}$; $u_p = 0,1$							Режим сушки 4: $t_c = 120^\circ C$; $v = 0,2 - 0,4 \text{ м/с}$ (свободный воздухообмен); $\varphi = 5\%$; $u_p = 0,1$; $m_0 = 0,246 \text{ ч}^{-1}$; $\bar{u}_0 = 0,946$; $(d\bar{u}/d\tau)_{\text{макс}} = 0,236 \text{ ч}^{-1}$						
\bar{u}	τ , ч экс.	τ , ч (16)	τ , ч (14)	τ , ч (15)	τ , ч (19)	τ , ч (23)	\bar{u}	τ , ч экс.	τ , ч (16)	τ , ч (14)	τ , ч (15)	τ , ч (19)	τ , ч (23)
0,7	2,0	2,0	1,92	1,97	1,86	1,82	0,7	1,2	1,17	1,14	1,17	1,30	1,2
0,5	4,7	4,46	4,35	4,96	4,27	4,20	0,6	1,8	1,73	1,75	1,75	1,90	1,82
0,4	6,5	6,62	6,25	6,92	6,20	6,20	0,4	2,8	2,90	2,83	2,85	2,90	3,20
0,3	8,2	7,85	8,22	8,87	8,26	7,80	0,3	3,8	3,90	3,61	3,90	3,90	4,10
0,2	11,3	11,30	11,21	12,20	11,60	10,9	0,2	4,7	4,65	4,45	4,75	4,60	4,85

Совпадение значений длительности сушки, вычисленных по формулам с экспериментом, находится в границах точности обработки опытных данных.

Режим сушки каждого материала определяется допустимой температурой. Исходя из общего уравнения кинетики скорости сушки, [23] Г. К. Филоненко [26] дает уравнение для определения температуры на поверхности материала в процессе сушки.

$$\bar{t}_n = t_c - (t_c - t_{м.т.}) N^* \tag{20}$$

где относительная скорость сушки N^* определяется по уравнению (3).

Сушка пекарских дрожжей и хлеба на сухари протекает без периода постоянной температуры на уровне $t_{м.т.}$ и температура возрастает непрерывно от начальной t_n до температуры среды t_c при $\tau \rightarrow \infty$.

Температура $t_{м.т.}$ определялась по $I-d$ -диаграмме влажного воздуха по заданным значениям t_c и φ – относительной влажности воздуха.

Табл. 3. Сравнение значений длительности сушки, вычисленных по формулам (14), (15), (16), (19), (23) с экспериментом в процессе конвективной сушки хлеба на поду

Table 3. Comparison of drying time values calculated by formulae (14), (15), (16), (19), (23) with the experimental ones in convective drying of hearth bread

Сушка ломтей хлеба на сухари на поду, толщина ломтей 23 мм													
Режим сушки 5: $t_c = 90^\circ C$; $v = 0,3 - 0,5$ м/с (свободный воздухообмен); $\bar{u}_0 = 0,83$; $(d\bar{u}/dt)_{\max} = 0,156 \text{ ч}^{-1}$; $u_p = 0,11$; $m_0 = 0,192 \text{ ч}^{-1}$							Режим сушки 6: $t_c = 120^\circ C$; $v = 0,3 - 0,5$ м/с (свободный воздухообмен); $\bar{u}_0 = 0,82$; $(d\bar{u}/dt)_{\max} = 0,345 \text{ ч}^{-1}$; $u_p = 0,11$; $m_0 = 0,488 \text{ ч}^{-1}$						
\bar{u}	τ , ч экс.	τ , ч (16)	τ , ч (14)	τ , ч (15)	τ , ч (19)	τ , ч (23)	\bar{u}	τ , ч экс.	τ , ч (16)	τ , ч (14)	τ , ч (15)	τ , ч (19)	τ , ч (23)
0,6	1,85	1,76	1,87	1,76	1,75	1,76	0,6	0,7	0,62	0,74	0,61	0,72	0,65
0,4	3,6	3,56	3,8	3,86	3,90	3,80	0,5	1,3	1,16	1,34	1,15	1,19	1,22
0,3	5,0	4,84	5,2	5,20	5,25	5,23	0,3	2,4	2,25	2,62	2,25	2,42	2,26
0,2	6,9	6,63	7,2	7,25	7,31	7,25	0,15	3,4	3,31	3,60	3,42	–	3,43

В таблице 4 приведены результаты сравнения расчетных значений температуры по формуле (20) с экспериментом при сушке дрожжей и хлеба на сухари. Несовпадения значений вызваны погрешностью при определении $t_{м.т.}$ по $I-d$ -диаграмме и ошибкой обработки опытных данных.

Табл. 4. Сопоставление значений температуры, вычисленных по формулам (20) и (24), с экспериментом в процессах сушки пекарских дрожжей и сушки хлеба на сухари

Table 4. Comparison of the temperature values calculated by formulas (20) and (24) with the experimental ones in the processes of drying bakery yeast and drying bread for making rusks

Пекарские дрожжи							
Режим сушки 1: $t_c = 40^\circ C$; $v = 2,9$ м/с; $\varphi = 24\%$; $\bar{u}_0 = 2,2$; $\bar{u}_{кр} = 0,9$; $u_p = 0,11$; $t_{м.т.} = 28^\circ C$; $m_t = 0,024 \text{ мин}^{-1}$				Режим сушки 2: $t_c = 60^\circ C$; $v = 2,9$ м/с; $\varphi = 24\%$; $\bar{u}_0 = 2,2$; $\bar{u}_{кр} = 0,8$; $u_p = 0,10$; $t_{м.т.} = 37^\circ C$; $m_t = 0,036 \text{ мин}^{-1}$			
\bar{u}	t , экс.	t , (20)	t , (24)	\bar{u}	t , экс.	t , (20)	t , (24)
0,8	29	29,5	27,5	0,7	41	39,5	38,5
0,6	30	30,6	28,5	0,5	45	46,2	43,5
0,4	32	32,5	30,5	0,4	49	49,6	47,5
0,3	33	33,4	32,4	0,3	51	52,5	50,5
0,2	36	37,2	33,6	0,2	53	54,5	52,5
Ломти хлеба на сухари							
Режим сушки: $t_c = 64^\circ C$; $v = 0,85$ м/с; $\varphi = 22\%$; $\bar{u}_0 = 0,73$; $u_p = 0,15$; $t_{м.т.} = 36^\circ C$; $m_t = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$				Режим сушки: $t_c = 64^\circ C$; $v = 2,5$ м/с; $\varphi = 29\%$; $\bar{u}_0 = 0,78$; $u_p = 0,15$; $t_{м.т.} = 30^\circ C$; $m_t = 1,91 \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$			
0,6	40	41,0	41,5	0,6	36	38,0	35,5
0,5	44,5	44,5	45,5	0,5	39	41,5	38,2
0,4	49,0	48,5	49,0	0,4	42	43,5	40,9
0,3	52,0	52,5	53,3	0,3	44	46,5	45,5
0,2	56,0	56,3	56,4	0,2	48	52,5	49,5

Регулярный режим

В периоде падающей скорости сушки при влагосодержаниях $\bar{u}_0 < \bar{u}_{кр}$ наступает регулярный режим влаготеплообмена, и, как отмечено А. В. Лыковым [23, 25, 29], несмотря на нестационарность процесса, можно использовать при расчетах кинетики сушки методы теории регулярного режима. В случае нагрева влажного тела в процессе сушки при $t_c = \text{const}$, когда можно пренебречь градиентом температуры по сечению тела и при значениях тепломасообменных критериев Bi и $Bi_m < 1$, которые принимают приближенно одинаковые значения, из решений дифференциальных уравнений тепломассопереноса следует [25]:

$$\bar{\Theta} = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{м.т.}} = \exp(m_t \tau_{II}); \quad (21)$$

$$\bar{U} = \frac{\bar{u} - \bar{u}_p}{\bar{u}_0 - u_p} = \exp(-m_u \tau), \quad (22)$$

где $\bar{\Theta}$ и \bar{U} – безразмерные температура и влагосодержание; m_t и m_u – темп нагрева влажного тела и темп убыли влагосодержания.

Из решений (21) и (22) определяется длительность сушки и температура материала во втором периоде:

$$\tau = \frac{1}{m_u} \ln \left(\frac{\bar{u} - \bar{u}_p}{\bar{u}_0 - u_p} \right); \quad (23)$$

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_{м.т.}) \exp(-m_t \tau_{II}). \quad (24)$$

Темп нагрева m_t и темп убыли влагосодержания m_u определяется из опыта, путем измерения температуры и влагосодержания в любых точках тела для двух последовательных моментов времени регулярного режима:

$$m_t = \frac{\ln \left(\frac{t_c - t_1}{t_c - t_2} \right)}{\tau_2 - \tau_1}; \quad m_u = \frac{\ln \left(\frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_1}{\bar{u}_0 - \bar{u}_2} \right)}{\tau_2 - \tau_1}.$$

Составление опытных данных по сушке хлеба на сухари показало, что коэффициент m_0 в формуле (17) представляет собой темп убыли влагосодержания m_u и определяется по уравнению (18). Теплообменный критерий Bi вычислялся по соотношению $Bi = \bar{\alpha}R / \lambda_{вл}$, где $\bar{\alpha}$ – коэффициент теплообмена; R – половина толщины пластины хлеба; $\lambda_{вл}$ – коэффициент теплопроводности влажного хлеба.

По данным [6, 7] для всех режимов сушки хлеба при $\bar{u}_0 = 0.8 - 0.95$, $\phi = 24 - 34 \%$, $t_c = 64; 90; 120$ °С коэффициент теплообмена изменялся в пределах от $\bar{\alpha} \approx 18 - 20$ Вт/м²°С до $\alpha \approx 5 - 6$, $\bar{u}_{кр} \approx 0,15 - 0,20$ ($\bar{u}_{кр}$ – конечное влагосодержание материала).

Коэффициент теплопроводности влажного хлеба $\lambda_{вл}$ при изменении влагосодержания от \bar{u}_0 до $\bar{u} \approx 0,2$ принимает значения от $\lambda_{вл} \approx 0.54$ Вт/м°С до $\lambda_{вл} \approx 0,24$ Вт/м°С [6].

Поскольку числитель и знаменатель в числе Био Bi одновременно уменьшаются, то критерий Bi принимает близкие значения $Bi \approx 0.26 - 0.33$. Следовательно, лимитирующим фактором, определяющим скорость сушки, является внешний теплообмен поверхности испарения материала с окружающей средой. Внутренний перенос слабо влияет на скорость сушки [2, 23].

В таблице 4 дано сравнение экспериментальных значений температуры материала с расчетными по уравнениям (20) и (24).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сушка дрожжей и пшеничного хлеба в кипящем слое относительно более эффективна, способствует сохранению свойств продукта, учитывая и тот факт, что дрожжи представляют собой живые микроорганизмы.

Метод обработки опытных данных обобщенными переменными для процессов сушки хлебопекарных дрожжей и хлеба на сухари применен впервые. Уравнение продолжительности сушки, полученное обработкой кривых сушки пекарских дрожжей и хлеба на сухари методами обобщенных переменных, содержит две постоянных: скорость сушки в первом периоде N и критическое влагосодержание $\bar{u}_{кр}$ для материалов, сушка которых протекает с периодом постоянной скорости. При сушке только в периоде падающей скорости для таких материалов необходимо знать максимальную скорость сушки.

В результате сравнительной оценки методик расчета продолжительности установлена высокая точность методики по обобщенным переменным. Проверка точности обработки опытных данных при сопоставлении расчетных значений времени сушки по уравнениям с экспериментом показало их полную адекватность опытным уравнениям. Отмеченная погрешность в 5–6 % находится в области ошибки эксперимента и обработки опытных данных.

Существенно, на 20–30 %, сокращается объем расчетной работы при применении новой методики.

Разработанная методика для расчета продолжительности применима в инженерных расчетах для конструирования и управления процессом на производстве.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Гинзбург, А. С. Технология сушки пищевых продуктов / А. С. Гинзбург. – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 248 с.
- 2 Мингалеева, З. Ш. Стабилизация качества дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* в процессе сушки / З. Ш. Мингалеева [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – № 15. – С. 115–117.
- 3 Замаев, С. М. Научное обеспечение процесса сушки хлебопекарных дрожжей в псевдоожиженном слое при осциллирующем теплоподводе: дис. ... к-та технич. наук / Сергей Михайлович Замаев. – Воронеж, 2007. – 196 с.
- 4 Бочарова, Г. А. Исследование процесса сушки пекарских дрожжей комбинированным методом: автореф. дис. ... к-та технич. наук / Галина Алексеевна Бочарова. – Воронеж, 1972. – 33 с.
- 5 Акулич, П. В. Расчеты сушильных и тепломассообменных установок / П. В. Акулич. – Минск: Беларуская навука, 2010. – 443 с.
- 6 Лыков, А. В. Теория сушки капиллярно-пористых коллоидных материалов пищевой промышленности / А. В. Лыков, Л. Я. Ауэрман. – М.: Пищепромиздат, 1946. – 285 с.
- 7 Лыков, М. В. Сушка в химической промышленности / М. В. Лыков. – М.: Химия, 1970. – 429 с.
- 8 Гинзбург, А. С. Сушка пищевых продуктов в кипящем слое / А. С. Гинзбург, В. А. Резчиков. – М.: Пищевая промышленность, 1966. – 196 с.
- 9 Расчеты аппаратов кипящего слоя: справочник/ под ред. И. П. Мухленова, Б. С. Сажина, В. Ф. Фролова. – Ленинград: Химия, 1986. – 352 с.
- 10 Романков, П. Г. Сушка во взвешенном состоянии. – 3-е изд., перераб. и доп. – Ленинград; М.: Химия [Ленингр. отд-ние], 1979. – 271 с.
- 11 Айнштейн, В. Г. Псевдоожижение / В. Г. Айнштейн. [и др.]. – М.: Химия, 1991. – 397.
- 12 Федоров, И. М. Теория и расчет процесса сушки во взвешенном состоянии / под ред. Н. М. Михайлова. – М.: Ленинград: Госэнергоиздат, 1955. – 176 с.
- 13 Лева, М. Псевдоожижение / пер. с англ. В. Г. Айнштейна; под ред. проф. Н. И. Гельперина. – М.: Гостоптехиздат, 1961. – 400 с.
- 14 Сыромятников, Н. И. Процессы в кипящем слое / Н. И. Сыромятников, В. Ф. Волков. – Свердловск: Металлургиздат. Свердловское отделение, 1959. – 248 с.
- 15 Романков, П. Г. Сушка в кипящем слое: Теория, конструкции, расчет / П. Г. Романков, Н. Б. Рашковская. – Ленинград; Москва: Химия [Ленингр. отд-ние], 1964. – 288 с.
- 16 Беранек, Я. Техника псевдоожижения / Я. Беранек, Д. Сокол; пер. с чешского канд. техн. наук В. Г. Айнштейна; под ред. [и с предисл.] д-ра техн. наук, проф. Н. И. Гельперина. – Москва: Гостоптехиздат, 1962. – 160 с.
- 17 Забродский, С. С. Гидродинамика и теплообмен в псевдоожиженном (кипящем) слое. – Ленинград: Госэнергоиздат, 1963. – 488 с.
- 18 Гинзбург, А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов: [для вузов по специальностям пище-

вой промышленности]. – Москва: Пищевая промышленность, 1973. – 528 с.

19 Гельперин, Н. И. Основы техники псевдооживления / Н. И. Гельперин, В. Г. Айнштейн, В. Б. Кваша; под ред. д-ра техн. наук, заслуж. деят. науки и техники РСФСР, проф. Н. И. Гельперина. – М.: Химия, 1967. – 664 с.

20 Рысин, А. П. Научные основы техники сушки пищевых продуктов в виброкипящем слое и промышленное внедрение сушильных установок: дис. ... д-ра технич. наук / Анатолий Петрович Рысин. – Москва, 1990. – 200 с.

21 Тодес, О. М. Аппараты с кипящим зернистым слоем: (Гидравлические и тепловые основы работы) / О. М. Тодес, О. Б. Цитович. – Ленинград; М.: Химия [Ленингр. отд-ние], 1981. – 296 с.

22 Кретов, И. Т. Оптимизация процесса сушки хлебопекарных дрожжей в кипящем слое / И. Т. Кретов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология, 1990. – № 2–3(195–196). – С. 74–75.

23 Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 470 с.

24 Красников, В. В. Кондуктивная сушка / В. В. Красников. – М.: Энергия, 1973. – 288 с.

25 Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. – М.: Ленинград: Госэнергоиздат, 1963. – 534 с.

26 Филоненко, Г. К. Сушка пищевых растительных материалов / Г. К. Филоненко, М. А. Гришин, Я. М. Гольденберг, В. К. Коссек. – М.: Пищевая промышленность, 1971. – 435 с.

27 Куц, П. С. Некоторые закономерности тепломассобмена и приближенные методы расчета кинетики процесса сушки влажных материалов / П. С. Куц, А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. – 1977. – Т. 32. – № 6. – С. 1007–1014.

28 Ольшанский, А. И. Некоторые закономерности кинетики сушки пищевых продуктов / А. И. Ольшанский, П. С. Куц // Известия ВУЗов. Пищевая технология. – 1977. – № 5. – С. 97–101.

29 Ольшанский, А. И. Экспериментальные исследования кинетики сушки тонких плоских влажных материалов методом регулярного режима с использованием обобщенных комплексных переменных / А. И. Ольшанский, А. М. Гусаров // Инженерно-физический журнал. – 2017. – Т. 90. – № 3. – С. 700–713.

Поступила в редакцию 01.09.2021 г.

ОБ АВТОРАХ:

Анатолий Иосифович Ольшанский, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства, Витебский государственный технологический университет, e-mail: tiomp@vstu.by.

Сергей Васильевич Жерносек, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства, Витебский государственный технологический университет, e-mail: zs_85@mail.ru.

Алексей Михайлович Гусаров, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства, Витебский государственный технологический университет, e-mail: tiomp@vstu.by.

ABOUT AUTHORS:

Anatolii I. Ol'shanskii, PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-building Production, Vitebsk State Technological University, e-mail: tiomp@vstu.by.

Sergei V. Zhernosek, PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-building Production, Vitebsk State Technological University, e-mail: zs_85@mail.ru.

Aleksei M. Gusarov, PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-building Production, Vitebsk State Technological University, e-mail: tiomp@vstu.by.