

К вопросу о продолжительности охлаждения хлебобулочных изделий

Д-р техн. наук С.В. ФРОЛОВ, канд. техн. наук В.Б. ДАНИН

Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий

The process of bread cooling after baking by air stream is considered. The algorithm of process duration calculation, taking into account water evaporation from product's surface, is suggested.

В настоящее время возник значительный интерес к интенсификации процесса охлаждения хлеба. Повышение требований к микробиологической безопасности хлеба привело к необходимости упаковки его в пленку. В свою очередь, упаковка в термолабильную пленку возможна лишь при достаточно низкой температуре продукта. С другой стороны, интенсификация процесса охлаждения приводит к увеличению скорости испарения влаги из продукта, в то время как усушка продукта строго нормирована.

Для того чтобы отыскать параметры процесса охлаждения хлеба, обеспечивающие высокую ин-

тенсивность процесса при соблюдении нормы усушки, необходимо сформулировать и решить задачу тепло- и массообмена.

При охлаждении хлеба происходит испарение влаги с поверхности продукта к охлаждающему воздуху, который омывает продукт, что, в свою очередь, приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи и уменьшению продолжительности процесса. Движущей силой этого процесса является разность влагосодержания воздуха у самой поверхности тела X_s (кг/м³) и в ядре потока X_a (кг/м³). То есть процесс имеет место только при условии, что влагосодержание воздуха у поверхности тела боль-

ше, чем в ядре потока $X_s > X_a$. При этом потерю влаги телом dM (кг) за время $d\tau$ (с) можно рассчитать по формуле [2]:

$$dM = \beta_s S_s (X_s - X_a) d\tau, \quad (1)$$

где β_s — коэффициент массоотдачи с поверхности продукта, м/с;

S_s — площадь поверхности продукта, м².

Влагосодержание воздуха X_a зависит от его температуры и относительной влажности и может быть определено из известной эмпирической формулы Филоненко [2]:

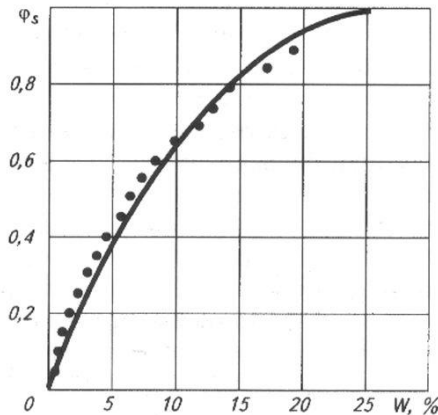
$$X(t, \varphi) = \varphi \exp \left\{ 10,56 - \frac{3654}{t + 230} \right\}, \quad (2)$$

где φ — относительная влажность воздуха (безразмерная);

t — температура воздуха, °С.

Температура воздуха в ядре потока равна некоторой известной величине t_a , а его относительная влажность φ_a , как правило, близка к единице. Температура воздуха у самой поверхности тела равна температуре поверхности t_s , которая за время процесса понижается от начальной температуры t_b до конечной t_e . А относительная влажность воздуха у поверхности тела φ_s зависит от того, в каком периоде идет сушка. Известно [2], что сушка хлеба всегда идет во втором периоде (период падающей скорости), то есть $\varphi_s < 1$. В [2] приведены экспериментальные данные по зависимости относительной влажности воздуха φ_s над поверхностью хлеба от влажности продукта W . Эти данные могут быть аппроксимированы следующей зависимостью:

$$\varphi_s = \begin{cases} 10W - 13,8W^{1,6}; & W < 0,27; \\ 1; & W > 0,27. \end{cases} \quad (3)$$



Зависимость относительной влажности воздуха φ_s над поверхностью хлеба от его влагосодержания W . Точки — экспериментальные данные, линия — аппроксимирующая зависимость

На рисунке показана зависимость (3) вкуче с экспериментальными данными, представленными в [2]. Таким образом, разность влагосодержаний воздуха у поверхности тела и в ядре потока возникает исключительно за счет разности температур поверхности продукта и охлаждающего воздуха. Отсюда ясно, что в основном усушка идет в начале процесса охлаждения, когда температура поверхности заметно выше температуры воздуха в ядре потока t_a .

Для нахождения коэффициента массоотдачи с поверхности тела β_s можно воспользоваться известным соотношением Льюиса [2]:

$$\alpha_d / \beta_s = C_a = 1280 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{°С}), \quad (4)$$

где α_d — «сухой» коэффициент теплоотдачи от поверхности тела, Вт/(м²·°С);

C_a — объемная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С). Числовое значение приведено для температуры 0 °С.

Уравнение теплового баланса

$$\alpha_w (t_s - t_a) dt = \alpha_d (t_s - t_a) dt + r \beta_s dM, \quad (5)$$

где α_w — «мокрый» коэффициент теплоотдачи, который учитывает потерю тепла за счет испарения влаги и вследствие этого зависит от температуры поверхности;

$r = 2,3 \cdot 10^6$ Дж/кг — удельная теплота парообразования воды.

Из формул (1), (4) и (5) получим связь между «мокрым» и «сухим» коэффициентами теплоотдачи:

$$\alpha_w = \alpha_d \left(1 + 1800 \cdot \frac{\varphi_s X_s - \varphi_a X_a}{t_s - t_a} \right). \quad (6)$$

Полная потеря массы продуктом за время охлаждения определяется посредством интегрирования формулы (1):

$$M = \frac{\alpha_d S_s}{C_a} \int_0^{\tau_p} [\varphi_s X_s(t_s(\tau)) - \varphi_a X_a] d\tau, \quad (7)$$

где τ_p — общая продолжительность испарения влаги, с;

$t_s(\tau)$ — температура поверхности тела как функция текущего времени τ .

Необходимо отметить, что продолжительность испарения влаги в случае охлаждения такого продукта, как хлеб, для которого сушка идет во втором периоде, вообще говоря, не совпадает со всей продолжительностью охлаждения. Как только влагосодержание воздуха у поверхности продукта уравнивается с влагосодержанием окружающего воздуха, испарение влаги прекращается. Это может произойти раньше, чем температура поверхности уравнивается с температурой окружающего воздуха.

Расчетная продолжительность охлаждения хлеба

v , м/с	1	2	1	1,5	2
Обдув	Вдоль	Вдоль	Поперек	Поперек	Поперек
α , Вт/(м ² ·°С)	10	15	20	25	30
$\tau_{\text{ох}}$, мин	139	106	89	80	73
$\tau_{\text{м}}$, мин	83	73	68	65	64
M , г	33,7	26,7	21,3	17,0	13,7
$\tau_{\text{исп}}$, мин	69	47	35	27	21

Поскольку процесс охлаждения достаточно длительный, можно воспользоваться приближением регулярного теплового режима [3], когда температура в произвольной точке тела приближенно описывается выражением

$$t \approx t_a + (t_b - t_a) A \exp(-m\tau), \quad (8)$$

где величина m (с⁻¹), называемая темпом охлаждения, не зависит от того, в какой точке тела измеряется температура t , а коэффициент A зависит от этой точки.

Запишем уравнение теплового баланса так

$$dt_v C_p V = -\alpha_w S_s (t_s - t_a) dt, \quad (9)$$

где t_v – среднеобъемная температура тела, °С;
 C – удельная теплоемкость тела, Дж/(кг·°С);
 ρ – его плотность, кг/м³;
 V – объем тела, м³.

Подставляя формулу (8) в выражение (9), получим:

$$\frac{t_s - t_a}{t_v - t_a} = \frac{A_{\text{нов}}}{A_{\text{ос}}} = \frac{mC\rho V}{\alpha S_s} = \frac{\Phi}{Bi} \kappa;$$

$$m = \frac{a}{R^2} \kappa;$$

$$\Phi = \frac{V}{S_s R}, \quad (10)$$

где Φ – безразмерный коэффициент формы тела;
 R – его характерный размер (расстояние от поверхности до наиболее удаленной от нее точки);
 a – температуропроводность тела, м²/с;
 κ – некоторый параметр, который может быть определен по следующей приближенной формуле [1]:

$$\kappa = \frac{Bi(k+1)(Bi+\sqrt{2k+6})(k+2\sqrt{2k+6}+5)}{4Bi^2+4(\sqrt{2k+6}+2)Bi+\sqrt{2k+6}(k+2\sqrt{2k+6}+5)};$$

$$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda};$$

$$k = \frac{1}{\Phi} - 1, \quad (11)$$

где Bi – безразмерное число Био;

λ – теплопроводность тела, Вт/(м·°С).

Что касается коэффициента A_v для среднеобъемной температуры, то при $Bi < 2$ имеет место $0,95 < A_v < 1$. Поскольку при охлаждении в воздухе число Bi , как правило, не превышает 2, то можно взять $A_v = 1$.

В результате численного интегрирования приведенных уравнений получаем продолжительность охлаждения хлеба, а также продолжительность испарения и количество испарившейся влаги.

Рассмотрим охлаждение формового хлеба, имеющего вид параллелепипеда размерами 0,2×0,1×0,1 м от начальной температуры 100 °С до конечной 30 °С посредством обдувания воздухом температурой 20 °С и скоростью $v = 1...2$ м/с. При этом коэффициент теплоотдачи в зависимости от направления и скорости обдува колеблется от 10 до 30 Вт/(м²·°С) [1]. Параметры хлеба следующие [4]: теплопроводность $\lambda = 0,4$ Вт/(м·°С); теплоемкость $c = 3 \cdot 10^3$ Дж/(кг·°С); влажность корки хлеба (с которой и идет испарение) $W = 0,04$; плотность хлеба $\rho = 500$ кг/м³. Результаты расчетов приведены в таблице: продолжительности «сухого» $\tau_{\text{сух}}$ и «мокрого» охлаждения $\tau_{\text{м}}$, масса испарившейся воды M и продолжительность испарения влаги $\tau_{\text{исп}}$.

Из данных таблицы видно следующее:

✓ Учет испарения воды при расчете продолжительности охлаждения существен лишь при небольших коэффициентах теплоотдачи, когда он может привести к сокращению продолжительности охлаждения на 40 %. При высоких же коэффициентах теплоотдачи влияние испарения невелико – всего 12 %.

✓ Количество испарившейся влаги достаточно мало – от 1 до 3 % массы батона, причем при высоких коэффициентах теплоотдачи влага испаряется лишь в течение первой трети процесса ввиду быстрого охлаждения поверхности. При низких коэффициентах теплоотдачи влага испаряется в течение почти всего процесса.

✓ Усушка продукта отвечает нормативам при достаточно высокой скорости обдува продукта воздухом.

Список литературы

1. Бараненко А.В., Куцакова В.Е., Борзенко Е.И., Фролов С.В. Примеры и задачи по холодильной технологии пищевых продуктов. Ч. 3. Теплофизические основы. – М.: КолосС, 2004.
2. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. – М.: Пищ. пром-сть, 1973.
3. Фролов С.В., Куцакова В.Е., Кипнис В.Л. Тепло- и массообмен в расчетах процессов холодильной технологии пищевых продуктов. – М.: Колос-Пресс, 2001.
4. Чижов Г.Б. Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов. – М.: Пищ. пром-сть, 1979.