

25887

Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ И ПИЩЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ



Кафедра технологии мясных,
рыбных продуктов и
консервирования холодом

РАСЧЕТ УСУШКИ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ И ХРАНЕНИИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Методические указания
к дипломному и курсовому проектированию
для студентов специальностей 260301, 260504,
бакалавров, магистрантов по направлению 552400
всех форм обучения

Второе издание, исправленное



Санкт-Петербург 2008

Фролов С.В. Расчет усушки при охлаждении и хранении пищевых продуктов: Метод. указания к дипломному и курсовому проектированию для студентов спец. 260301, 260504, бакалавров, магистрантов по направлению 552400 всех форм обучения / Под. ред. В.Е. Куцаковой. 2-е изд., испр. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2008. – 18 с.

Изложен необходимый теоретический материал для расчета усушки при охлаждении и хранении пищевых продуктов. Приведена программа, выполняющая расчет усушки при охлаждении, и инструкция по пользованию программой.

Рецензент
Доктор техн. наук, проф. Л.В. Красникова

Рекомендованы к изданию редакционно-издательским советом университета

© Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий, 2001, 2008

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Усушка продукта при его охлаждении или хранении происходит вследствие массового тока влаги от поверхности продукта к охлаждающему воздуху, который омывает продукт. 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 больше, чем в ядре потока ($X_s > X_a$). При этом потерю влаги телом (dM , кг) за время (dt , с) можно рассчитать по формуле [1]

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

где S_s – площадь поверхности продукта, м²; β_s – коэффициент массоотдачи с поверхности продукта, м/с.

Выясним, за счёт чего может оказаться $X_s > X_a$. Влагосодержание воздуха зависит от его температуры и относительной влажности и может быть определено из известной эмпирической формулы Филоненко [1]

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

где φ – относительная влажность воздуха (безразмерная); t – температура воздуха, °С.

Рассмотрим процесс усушки при охлаждении пищевых продуктов. 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 некоторой начальной температуры t_b до конечной t_e . А относительная влажность воздуха у поверхности тела φ_s зависит от того, в каком периоде идёт сушка. Известно [1], что сушка любого материала разде-

ляется на два периода. В первом периоде (период постоянной скорости сушки) водяной пар над поверхностью тела является насыщенным, т. е. $\phi_s = 1$. Во втором периоде (период падающей скорости) $\phi_s < 1$. Как правило, усушка при охлаждении идёт в первом периоде, т. е. $\phi_s = 1$. Хотя для некоторых продуктов (например, хлеба) не существует первого периода, и сушка всегда идёт во втором периоде. Таким образом, разность влагосодержаний воздуха у поверхности тела и в ядре потока возникает исключительно за счёт разности температур поверхности продукта и охлаждающего воздуха. Отсюда ясно, что в основном усушка идёт в начале процесса охлаждения, когда температура поверхности заметно выше температуры воздуха в ядре потока t_a .

Для расчёта усушки необходимо знание коэффициента массоотдачи с поверхности тела β_s , который можно найти из известного эмпирического соотношения Льюиса

$$\frac{\alpha_d}{\beta_s} = C_a = 1280 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \text{ } ^\circ\text{C}), \quad (3)$$

где α_d – "сухой" коэффициент теплоотдачи от поверхности тела, Вт/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}); C_a – объёмная теплоёмкость воздуха, Дж/(кг \text{ } ^\circ\text{C}). Числовое значение приведено для температуры 0 \text{ } ^\circ\text{C}. Используя уравнение теплового баланса

$$\alpha_w (t_s - t_a) dt = \alpha_d (t_s - t_a) dt + \beta_s dM, \quad (4)$$

где α_w – "мокрый" коэффициент теплоотдачи (учитывает потерю тепла за счёт испарения влаги и вследствие этого зависит от температуры поверхности), и формулы (2) и (3), получим связь между "мокрым" и "сухим" коэффициентами теплоотдачи

$$\alpha_w = \alpha_d \left(1 + 7,8 \cdot 10^{-4} \frac{\phi_s X_s - \phi_a X_a}{t_s - t_a} \right), \quad (5)$$

Итак полная усушка определяется посредством интегрирования

формулы (1) по всему времени охлаждения, с учётом выражений (2) и (3)

$$M = \frac{\alpha_d S_s}{C_a} \int_0^{\tau_p} (\phi_s X_s(t_s(\tau)) - \phi_a X_a) d\tau, \quad (6)$$

где τ_p – общая продолжительность процесса, с; $t_s(\tau)$ – температура поверхности тела как функция текущего времени τ .

Иногда при определении усушки вместо вычисления интеграла в формуле (6) пользуются упрощённым методом Леви. Поскольку зависимость температуры от времени при охлаждении носит экспоненциальный характер, то в выражение для $X_s(t)$ подставляется среднее логарифмическое значение температуры поверхности за время процесса

$$M = \frac{\alpha_d S_s}{C_a} (\phi_s X_s(\bar{t}_s) - \phi_a X_a) \tau_p; \quad \bar{t}_s = (t_b - t_c) \left\{ \ln \frac{t_b - t_a}{t_c - t_a} \right\}^{-1}.$$

Однако эти соотношения дают весьма неточный результат, поскольку в уравнении (6) интегрируется не сама разность температур $(t_s - t_a)$, а разность влагосодержаний $(X_s(t_s) - X_a)$, которая зависит от температур сложным нелинейным образом (2). Для более точного определения усушки необходимо также знать зависимость температуры поверхности от времени и общую продолжительность процесса.

Процесс охлаждения в пищевой технологии достаточно длительный, поэтому можно воспользоваться приближением регулярного теплового режима [2], когда температура в произвольной точке тела приближённо описывается выражением

$$t \sim t_a + (t_b - t_a) A \exp \{-m \tau\}, \quad (7)$$

где величина $m, \text{ с}^{-1}$, 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

$$dt, C_p V = -\alpha_w S_s (t_s - t_a) d\tau, \quad (8)$$

где t_v – среднеобъёмная температура тела, °C; C – удельная теплоемкость тела, Дж/(кг °C); ρ – его плотность, кг/м³; V – объем, м³. Подставляя формулу (7) в выражение (8), получим

$$\frac{t_s - t_a}{t_v - t_a} = \frac{A_{\text{пов}}}{A_{\text{об}}} = \frac{m C \rho V}{\alpha S_s} = \frac{\Phi}{Bi} \kappa; \quad m = \frac{a}{R^2} \kappa; \quad \Phi = \frac{V}{S_s R}, \quad (9)$$

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 [3]:

$$\kappa \approx \frac{Bi}{\Phi \sqrt{1 + (0,664 + 0,164 Bi) / Bi \Phi^{1/2}}}; \quad Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}, \quad (10)$$

где Bi – безразмерное число Био; λ – теплопроводность тела, Вт/(м °C).

Рассмотрим коэффициент A_v для среднеобъемной температуры. Для тел простой формы 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 получаем следующий алгоритм расчёта усушки при охлаждении (при условии $\phi_s = 1$):

1. Выбираем шаг по времени dt .
2. Принимаем $t_s(0) = t_b$ в качестве начального значения температуры поверхности.
3. Из соотношения (5) определяем "влажный" коэффициент теплоотдачи.
4. Из уравнений (7), (9), (10) определяем значение среднеобъемной температуры t_v .
5. Из соотношения (8) определяем новое значение температуры поверхности t_s .
6. Из соотношений (1) и (3) определяем усушку dM за время dt .

7. Возвращаемся к пункту 3 и снова рассчитываем "влажный" коэффициент теплоотдачи через новое значение температуры поверхности.

8. Повторяем пункты 3 – 7 до тех пор, пока среднеобъемная температура не достигнет требуемого конечного значения.

Ниже приведён текст программы (на языке QuickBasic), производящей все необходимые вычисления. Программа представлена в виде непосредственно исполняемого файла usuohljaj.exe.

Теперь рассмотрим процесс усушки при хранении пищевых продуктов. Здесь ситуация прямо противоположная вышеописанной. Очевидно, что при хранении температура продукта равна температуре окружающего воздуха, поэтому усушка может идти исключительно за счёт несто процентной относительной влажности воздуха в камере хранения. Обычно это действительно так. В камере хранения имеются охлаждающие элементы, температура которых ниже, чем температура воздуха в камере, и излишняя влага кристаллизуется на них.

Запишем уравнение баланса влаги в камере хранения

$$\beta_s S (X(t_s) - \phi_a X(t_a)) = \beta_c S_c (\phi_a X(t_a) - X(t_c)), \quad (11)$$

где индекс "s" относится к поверхности продукта, а индекс "c" – к поверхности охлаждающих элементов камеры. Определим загруженность камеры N

$$N = \frac{\beta_s S_s}{\beta_c S_c} = \frac{S_s}{S_c}. \quad (12)$$

Поскольку продукт и охлаждающие элементы находятся в одинаковых условиях, то коэффициенты массоотдачи β_s и β_c примерно одинаковые, и коэффициент N примерно равен отношению суммарной площади хранящейся в камере продукции к суммарной площади охлаждающих элементов камеры. Подставляя выражение (12) в уравнение (11), получим

$$\varphi_a = \frac{NX(t_s) + X(t_c)}{X(t_a)(1 + N)} \quad (13)$$

При длительном хранении температура продукта становится равной температуре воздуха в камере ($t_s = t_a$), поэтому выражение (13) упрощается

$$\varphi_a = \frac{N + X(t_c)/X(t_a)}{N + 1} \quad (14)$$

Подставляя уравнение (14) в выражение (1), получим

$$M = \beta_s S_s \tau X(t_a) (1 - \varphi_a) = \beta_s S_s \tau \frac{X(t_a) - X(t_c)}{N + 1} \quad (15)$$

Формула (15), совместно с формулой Филоненко (2) и формулой Льюиса (3), позволяет рассчитывать усушку при хранении.

Если усушка продукта идёт не в первом периоде, то реальное значение потери массы будет меньше, чем рассчитанное по приведённому алгоритму. На практике, обычно, вводят понятие коэффициента сопротивления испарению [2], который равен отношению реальной усушки к массе испарившейся со свободной поверхности воды при тех же условиях. Для некоторых продуктов эти коэффициенты известны [2]. Отметим, что для определения этого коэффициента необходимы довольно трудоёмкие эксперименты по изопластики [2], посредством которых определяется влагосодержание воздуха над поверхностью продукта как функция его температуры и влажности. Во всяком случае можно утверждать, что изложенный алгоритм позволяет определить максимально возможное в данных условиях значение усушки. Если известен коэффициент сопротивления испарению, то полученный результат необходимо поделить на этот коэффициент.

Для определения "сухого" коэффициента теплоотдачи можно использовать известные многочисленные эмпирические соотношения [2, 4].

Рассмотрим несколько примеров.

Пример расчета усушки при охлаждении.

Пусть на охлаждение подаются тушки курицы массой 1,4 кг. Параметры тушек следующие: характерный размер (для тушек курицы принимается равным толщине грудной мышцы) $R = 0,037$ м; площадь поверхности тушки $S_s = 0,095$ м²; $\Phi = 0,38$; $a = 1,13 \cdot 10^{-7}$ м²/с; $\lambda = 0,408$ Вт/(м °С); $C = 3435$ Дж/(кг °С); $\rho = 1050$ кг/м³; $\alpha = 20$ Вт/(м² °С) (отвечает обдуву тушек воздухом со скоростью 2,5 м/с). При охлаждении тушки воздухом со стопроцентной относительной влажностью и температурой $t_a = -5$ °С от начальной температуры $t_b = 35$ °С до конечной $t_c = 4$ °С, при условии, что испарение с поверхности тушки идёт как со свободной поверхности воды, получаем время охлаждения $\tau = 91$ мин, масса испарившейся воды $M = 52$ г. Согласно имеющимся данным [2], коэффициент сопротивления испарению у тушек курицы равен 1,7 – 2,8, что приводит к реальной усушке $M \sim 19 - 31$ г. Это составляет 1,4 – 2,2 % от общей массы тушки.

Пример расчёта усушки при хранении.

Пусть у нас хранятся говяжьи полутуши при температуре $t_a = -18$ °С. Температура охлаждающих элементов в камере $t_c = -35$ °С. Соответствующие значения влагосодержания: $X(t_a) = 1,26 \cdot 10^{-3}$ кг/м³; $X(t_c) = 2,8 \cdot 10^{-4}$ кг/м³; разность влагосодержаний $X(t_a) - X(t_c) = 9,8 \cdot 10^{-4}$ кг/м³. Принимаем "сухой" коэффициент теплоотдачи $\alpha_d = 5$ Вт/(м² °С) (такое значение отвечает обдуванию туши со скоростью в несколько десятых метра в секунду). Пусть масса одной полутуши составляет 100 кг, её поверхность 3,4 м². Ёмкость камеры хранения 50 т, суммарная площадь охлаждающих элементов $S_c = 100$ м². Отсюда суммарная площадь поверхности находящегося в камере продукта $S_s = 1700$ м², загруженность камеры $N = 17$, суммарная усушка находящегося в камере продукта 31 кг в сутки, что составляет 0,06 % в сутки. Необходимо однако отметить, что по прошествии некоторого времени скорость усушки уменьшается в связи с обезвоживанием поверхностного слоя продукта. Так, по прошествии месяца скорость усушки уменьшается на 15 – 20 %.

2. ИНСТРУКЦИЯ ПО РАБОТЕ С ПРОГРАММОЙ

В настоящем разделе приведена подробная инструкция по пользованию программой. Она рассчитана на пользователя, не имеющего никаких навыков работы на компьютере.

1. Включить машину. Для этого воткнуть вилку блока питания в розетку, включить сам блок переключателем "сеть" и нажать кнопку "power" на корпусе компьютера.

2. Подождать около одной минуты пока машина загрузится, т. е. до появления на экране синих панелей (Norton Commander).

3. На экране будет виден курсор, который перемещается по экрану посредством нажатия кнопок со стрелочками (курсорных клавиш). Необходимо подвести курсор к названию файла "usuohlaj.exe" и нажать клавишу "Enter".

4. После этого программа сама начнет запрашивать исходные данные. Вводить их следует посредством клавиш с цифрами. Вместо запятой, которая отделяет целую часть числа от дробной, следует использовать точку (клавиша с буквой "ю"). Если целая часть числа равна нулю, то вводить перед точкой нуль не обязательно (например, число 0,5 можно набрать так: .5). При вводе отрицательных чисел перед ними необходимо набрать знак "минус" (клавиша справа от клавиши "нуль"). После того как число набрано, необходимо нажать клавишу "Enter", и машина сама запросит следующее данное.

5. После того как все данные будут введены, машина выдаст на экран расчетное время охлаждения и усушку и снова выйдет в DOS. На экране появятся синие панели Norton Commander. Если вам необходимо снова увидеть экран DOS с расчетными данными (то есть убрать панели), нажмите "Ctrl - O".

6. Если при вводе данных вы ошиблись и набрали не те цифры:

а) если при этом вы не успели нажать клавишу "Enter", то вы можете убрать неправильные цифры с помощью клавиши "Back Space";

б) если вы уже нажали "Enter", т. е. ввели неправильное данное в программу, то придется досчитать до конца с неправильными данными, а затем запустить программу снова.

7. После окончания вычислений, необходимо выключить машину в последовательности, обратной п. 1 (кнопка "Power", переключатель "сеть" на блоке питания, вилка из розетки).

3. ПРОГРАММА

```
INPUT "Задайте температуру окружающей среды (C): ", TA
INPUT "Задайте относительную влажность воздуха: ", fi
INPUT "Задайте характерный размер тела: ", R
INPUT "Задайте плотность тела (кг/м^3): ", ro
INPUT "Задайте сухой коэффициент теплоотдачи (Вт/(м^2*С)): ", A
INPUT "Задайте теплопроводность тела (Вт/(м*С)): ", L
INPUT "Задайте теплоемкость тела (Дж/(кг*С)): ", C
INPUT "Задайте начальную температуру тела (C): ", TB
INPUT "Задайте коэффициент формы: ", f
INPUT "Задайте шаг по времени (с)", DT
INPUT "Задайте поверхность тела (м^2): ", S
INPUT "Задайте требуемую среднеобъемную температуру (C): ", TT
C = C * ro
XA = fi * EXP(10.56 - 3654 / (TA + 230))
Bi = A * R / L
ka = Bi / (f * SQR(1 + (.664 + .164 * Bi) * Bi * f ^ .5))
m = ka * L / (C * R ^ 2)
mass = 0
time = DT / 2
TS = TA + (TB - TA) * ka * f / Bi
TM = TB
DO
XS = EXP(10.56 - 3654 / (TS + 230))
AW = A * (1 + .00078 * (XS - XA) / (TS - TA))
DM = .78 * A * (XS - XA) * DT * S
mass = mass + DM
```

```

BiW = AW * R / L
kaW = BiW / (f * SQR(1 + (.664 + .164 * BiW) * BiW * f ^ .5))
mW = kaW * L / (C * R ^ 2)
TM = TM - (TB - TA) * mW * DT * EXP(-mW * time)
TS = TA + C * R * f * (TB - TA) * mW * EXP(-mW * time) / AW
IF TM < TT THEN EXIT DO
time = time + DT
LOOP
PRINT "Время охлаждения (мин): ", (time + DT / 2) / 60
PRINT "Масса испарившейся воды (г): ", mass
END

```

Список литературы

1. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. – М.: Пищ. пром-сть, 1973.– 528 с.
2. Чижов Г.Б. Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов. – М.: Пищ. пром-сть, 1979.– 272 с.
3. Куцакова В.Е., Фролов С.В., Крупененков Н.Ф. К расчёту времени гидроаэрозольно-испарительного охлаждения тушек птицы // Вестник международной академии холода, вып. 2, 1999. – С. 44–45.
4. Рогов И.А., Куцакова В.Е., Филиппов В.И., Фролов С.В. Консервирование пищевых продуктов холодом (теплофизические основы), 2-е изд., расш. и доп. – М.: Колос, 1999. – 160 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Теоретические положения	3
2. Инструкция по работе с программой	10
3. Программа	11
Список литературы	12

Фролов Сергей Владимирович

РАСЧЕТ УСУШКИ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ И ХРАНЕНИИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Методические указания
к дипломному и курсовому проектированию
для студентов специальностей 260301, 260504,
бакалавров, магистрантов по направлению 552400
всех форм обучения

Второе издание, исправленное

Редакторы

Т.Г. Смирнова, Е.С. Лаврентьева

Корректор

Н.И. Михайлова

Подписано в печать 20.03.08. Формат 60×84 1/16
Усл. печ. л. 0,93. Печ. л. 1,00. Уч.-изд. л. 0,75
Тираж 50 экз. Заказ № 122 С 15

СПбГУНиПТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9
ИИК СПбГУНиПТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9