

УДК 621.565:664.95

Методика расчета скорости усушки пищевого продукта в зависимости от активности воды в процессах холодильной технологии

Д-р техн. наук В. Н. ЭРЛИХМАН, д-р техн. наук Ю. А. ФАТЫХОВ
elina@klgtu.ru

Калининградский государственный технический университет

В процессах холодильной технологии потери массы пищевого продукта определяются температурными и влажностными параметрами окружающей среды и активности воды продукта. Существующие формулы для расчета массообменных процессов не учитывают температурную зависимость активности воды. Авторами предложено ранее полученное выражение для определения скорости испарения влаги из пищевого продукта при различных температурах с учетом гигротермических параметров окружающей среды, интенсивности теплообмена и активности воды. Для установления зависимости активности воды пищевых продуктов от температуры в области их отрицательных значений предложено использовать аналог тканевой влаги, обладающего свойствами разбавленного недиссоциированного молекулярного раствора. Критерием адекватности поведения тканевой влаги пищевого продукта и его аналога может быть доля вымороженной воды. В качестве аналога тканевых соков пищевых продуктов принят водный раствор этанола с массовой концентрацией 0,025 и температурой начала замерзания -1°C . Приведены результаты расчетного определения понижения температуры замерзания и доли вымороженной воды для водных растворов этанола различной концентрации в сравнении с экспериментальными данными. Удовлетворительные результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных получены для диапазона температур $(-1...-34)^{\circ}\text{C}$, что соответствует промышленным режимам холодильной обработки большинства пищевых продуктов. В этом диапазоне температур активность воды водного раствора этанола с понижением температуры уменьшается с 0,990 до 0,748, что в среднем составляет уменьшение активности воды 0,007 на каждый градус понижения температуры. Материалы статьи могут быть использованы в качестве методики расчета скорости усушки пищевого продукта, в зависимости от активности воды, определяемой по аналогу тканевой влаги продукта в диапазоне промышленных температур холодильной технологии.

Ключевые слова: пищевой продукт, скорость усушки, активность воды, тканевая влага, аналог, этанол.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 06.08.2018, принята к печати 14.10.2018

DOI: 10.17586/1606-4313-2018-17-4-10-14

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Эрлихман В. Н., Фатыхов Ю. А. Методика расчета скорости усушки пищевого продукта в зависимости от активности воды в процессах холодильной технологии // Вестник Международной академии холода. 2018. № 4. С. 10–14.

Calculation of food product drying speed depending on water activity in the refrigeration processes

D. Sc. V. N. ERLIKHMAN, D. Sc. J. A. FATYKHOV

elina@klgtu.ru

Kaliningrad State Technical University

In the processes of refrigeration the losses of food product mass is determined by temperature and moisture parameters of ambient environment and water activity of the product. The formulae for calculating mass exchanging processes in use do not take into account temperature dependence of water activity. The authors suggest using the expression which was been obtained earlier for determining speed of water evaporation from food product at different temperatures taking into account gigrothermal parameters of ambient environment, the intensiveness of thermal — mass exchange and water activity. To determine the dependence of food product water activity on the negative temperature range it is suggested to use an analogue of tissue moisture with the properties similar to the ones of diluted molecular solution. The share of frozen water can be chosen as a adequacy criterion for tissue moisture of food product and its analogue. As an analogue of tissue juice of food products the water solution of ethyl alcohol with mass concentration of 0.025 and freezing onset temperature of -1°C is taken. The results of calculation for freezing temperature lowering and the share of frozen water for water solutions of ethyl alcohol with different concentration and their comparison with the experimental data are presented. Satisfactory results of calculated and experimental data comparison for the temperature range of $(-1...-34)^{\circ}\text{C}$ have been

obtained, which corresponds to the industrial modes for refrigeration processes of food products. Within this temperature range the water activity of ethyl alcohol water solution drops with the temperature lowering from 0.990 to 0.748, that on the average amounts to water activity decrease of 0.007 to each degree of temperature drop. The data presented can be used as a calculation method to determine food products drying depending on water activity calculated by an analogue product tissue moisture within the range of industrial temperatures of refrigeration.

Keywords: food product, drying speed, water activity, tissue moisture, analogue, ethyl alcohol.

Article info:

Received 06/08/2018, accepted 14/10/2018

DOI: 10.17586/1606-4313-2018-17-4-10-14

Article in Russian

For citation:

Erlikhman V. N., Fatykhov J. A. Calculation of food product drying speed depending on water activity in the refrigeration processes. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2018. No 4. p. 10–14.

Введение

Потери массы и качества пищевого продукта в процессах холодильной технологии определяются температурными и влажностными параметрами окружающей среды и активностью воды самого продукта [1]. Активность воды является важной технологической и физико-химической характеристикой пищевого продукта, определяющей его микробиологическую стойкость и естественные потери из-за усушки в процессе массообмена [2, 3]. Активность воды a_w представляет собой отношение давления водяного пара в пограничном слое над продуктом p_p к давлению насыщенных водяных паров над чистой водой p''_n при одинаковых температурах, т. е.

$$a_w = p_p / p''_n \tag{1}$$

Значение a_w , выраженное в процентах, является равновесной относительной влажностью, т. е. свойством атмосферы, окружающей продукт, при которой испарение и поглощение влаги не происходит [1, 3].

Существующие формулы для расчета массообменных процессов при холодильной обработке и хранении пищевых продуктов (например, в работах [4, 11]), по которым можно определить скорость испарения влаги из пищевого продукта, не учитывают температурную зависимость активности воды. При замораживании тканевая влага пищевых продуктов, представляющая собой сложные водные растворы солей, кислот и органических веществ, вследствие фазового превращения части влаги в лед, увеличивает свою концентрацию, при этом активность воды уменьшается. Активность воды является функцией влагосодержания продукта, его химического состава и структуры [1], и закономерности изменения этого показателя, в зависимости от температурных условий, не установлены. Решение задачи возможно, если будет подобран аналог тканевой влаги пищевого продукта, который обеспечит приемлемую точность расчетного определения активности воды в условиях тепло- и массообмена процессов холодильной технологии.

Цель данного исследования заключается в разработке расчетного метода определения скорости испарения влаги из пищевого продукта при различных температурах, с учетом гигротермических параметров окружающей среды, интенсивности теплообмена и активности воды.

Методика расчета

Исходя из принятых условий, а также используя классическое уравнение массоотдачи [4] и уравнение Льюиса, связывающего тепло- и массообмен, авторами получено выражение для определения скорости испарения влаги из пищевого продукта в следующем виде:

$$W = \frac{\alpha}{c_c} a_w \left(d''_n - \frac{1}{a_w} 0,622 \frac{T_n}{T_0} \cdot \frac{\varphi_0 p_0''}{p_\delta - p_n''} \right) \cdot F \frac{101,3 \cdot 10^3}{p_\delta} \tag{2}$$

где α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);
 c_c — удельная массовая теплоемкость сухого воздуха в диапазоне температур –50,30 °С, $c_c = 1,006 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К) [5];
 d''_n — влагосодержание насыщенного воздуха на поверхности продукта, (кг вл/кг св);
 T_n — температура поверхности продукта, К;
 T_0 — температура окружающей среды, К;
 φ_0 и p''_0 — относительная влажность и давление (Па) насыщенных водяных паров окружающего воздуха;
 p_δ — барометрическое давление, Па;
 F — поверхность тепло-массообмена, м².

Выражение (2) отражает зависимость скорости усушки пищевого продукта от активности воды, температуры продукта и условий теплообмена при холодильной обработке и хранении, учитываемых теплофизическими и гигротермическими параметрами окружающей среды. Так как зависимость активности воды большинства пищевых продуктов от температуры в области их отрицательных значений не установлена, можно для получения такой зависимости использовать аналог тканевой влаги (сока) пищевых продуктов, обладающего свойствами разбавленного недиссоциированного молекулярного раствора, для которого такие закономерности достоверно устанавливаются на основании теории растворов [6, 7].

Критерием адекватности поведения тканевой влаги пищевого продукта и его аналога может быть такой показатель, как доля вымороженной воды. Как известно [1], в пищевых продуктах лед при замораживании образуется из тканевого сока, являющегося разбавленным раствором, причем кристаллизуется растворитель вода, а концентрация оставшегося в жидком состоянии раствора по мере понижения температуры возрастает.

Доля вымороженной воды в пищевых продуктах определяется по формуле Г. Б. Чижова [8], которая широко используется на практике и дает достаточно точные результаты для большинства продуктов

$$\omega_{ip} = 1 - \frac{t_{нз}}{t_i}, \quad (3)$$

где ω_{ip} — доля вымороженной воды при температуре t_i ; $t_{нз}$ — температура начала замерзания тканевой влаги, °С.

В качестве аналога тканевых соков пищевых продуктов нами принят водный раствор этанола с массовой концентрацией $\xi_3 = 0,025$ и температурой начала замерзания $t_{нз} = -1$ °С. Такая температура начала замерзания тканевой влаги присуща большинству пищевых продуктов [1, 8]. Экспериментальная зависимость температуры замерзания водного раствора этанола от концентрации принята по источнику [9]. Для расчетного определения понижения температуры замерзания водного раствора этанола, при его различных концентрациях, применима известная из теории растворов формула:

$$\Delta t_{zi} = k \frac{t_{нз}}{t_i} = k M_{zi}, \quad (4)$$

где k — криоскопическая постоянная,

$k = 1,86$ для количества воды в растворе $m_B = 1000$ г;

m_{zi} — масса этанола, приходящаяся на $m_B = 1000$ г воды при i -концентрации этанола;

μ_3 — молекулярная масса этанола, $\mu_3 = 46,063$;

M_{zi} — число молей этанола в растворе при i -концентрации этанола (моляльность).

Так как массовая концентрация этанола в водном растворе описывается формулой

$$\xi_3 = \frac{m_3}{m_3 + m_B}, \quad (5)$$

то выражение для массы этанола, приходящейся на количество воды $m_B = 1000$ г, в зависимости от его концентрации имеет вид

$$m_{zi} = 1000 \frac{\xi_{3zi}}{1 - \xi_{3zi}}. \quad (6)$$

Для определения доли вымороженной влаги по экспериментальным данным [9] использовали выражение для концентрации воды в растворе при температуре $t_{нз}$ (при условии, что лед еще не образуется) ξ_B и концентрации воды в растворе при температуре $t_i < t_{нз}$, при которой масса этанола в растворе остается постоянной, а масса воды уменьшается за счет ее превращения в лед ξ_{Bi}

$$\xi_B = \frac{m_B}{m_B + m_3}; \quad \xi_{Bi} = \frac{m_{Bi}}{m_{Bi} + m_3}. \quad (7)$$

Из выражений (7), масса воды при $t_{нз}$ и t_i составит

$$m_B = m_3 \frac{\xi_B}{1 - \xi_B}; \quad m_{Bi} = m_3 \frac{\xi_{Bi}}{1 - \xi_{Bi}}. \quad (8)$$

Разница между значениями m_B и m_{Bi} дает массу льда, образовавшегося в растворе этанола при температуре t_i , т. е.

$$m_{li} = m_B - m_{Bi} = m_3 \left(\frac{\xi_B}{1 - \xi_B} - \frac{\xi_{Bi}}{1 - \xi_{Bi}} \right). \quad (9)$$

Разделив левую и правую часть уравнения (9) на массу воды до замораживания раствора этанола ($m_3 = 1000$ г), получим выражение для доли вымороженной воды при температуре t_i :

$$\omega_i = \frac{m_{li}}{m_B} = \frac{m_3}{m_B} \left(\frac{\xi_B}{1 - \xi_B} - \frac{\xi_{Bi}}{1 - \xi_{Bi}} \right). \quad (10)$$

Для определения давления над раствором p_p и активности воды a_w применим закон Рауля, согласно которому относительное понижение давления водяного пара над раствором равно мольной доле растворенного вещества (этанола) N_3 , т. е.

$$N_3 = \frac{p_p^* - p_p}{p_p^*}. \quad (11)$$

Используя формулу (1) выражение для активности воды принимает вид

$$a_w = 1 - N_3. \quad (12)$$

С другой стороны мольная доля этанола, зависящая от концентрации раствора, равна

$$N_{3i} = \frac{M_{3i}}{M_{3i} + M_B}, \quad (13)$$

где M_B — число молей воды в растворе, равное $M_B = m_B / \mu_B$.

Так как расчетные величины M_3 выполнены на количество воды в растворе $m_B = 1000$ г, а $\mu_B = 18,01$, то $M_B = 1000/18,01 = 55,56$.

Обсуждение результатов расчета

Результаты расчетного определения понижения температуры замерзания и доли вымороженной воды для водных растворов этанола различной концентрации в сравнении с экспериментальными данными представлены в табл. 1. По ним можно выделить диапазон температур, в котором сопоставление расчетных и экспериментальных данных дает удовлетворительные результаты.

Этот диапазон составляет от -1 до -34 °С и соответствует промышленным режимам холодильной обработки и хранения подавляющего большинства пищевых продуктов. Применение в теплофизических расчетах, в качестве аналога тканевой влаги пищевых продуктов, раствора этанола позволяет определить понижение температуры замерзания, в среднем, с ошибкой по абсолютной величине 6%. Расхождения в долях вымороженной влаги между расчетными и экспериментальными данными не превышает 1,6%. Представленные данные позволяют утверждать о правомочности использования в теплофизических расчетах, в качестве аналога тканевой влаги (сока), водного раствора этанола. По своей физической природе этанол (синтетический спирт; одно из названий этилового спирта или просто спирта и т. п.) является продуктом переработки, в том числе, крахмало- и сахаросодержащих пищевых продуктов [10], что только подтверждает оправданность его выбора в качестве аналога.

В научной литературе встречаются попытки использования в качестве аналога тканевой влаги продукта водного раствора NaCl. Наши расчеты для концентрации соли $\xi = 0,11$ показывают существенное (до 50%) расхождение данных по понижению температуры замерзания

Таблица 1

Экспериментальные и расчетные величины понижения температуры заморозания и доли вымороженной воды водного раствора этанола

Table 1

Experimental and calculated values of lowering freezing temperature and share of frozen water of ethyl alcohol water solution

Данные эксперимента [9]			Масса этанола на 1000 г воды m_2 , г	Моляльность M_2	Расчетное понижение Δt_3 по результатам эксперимента, формула (4)	Относительная разница $\frac{\Delta t_3 - \Delta t_3}{\Delta t_3} \cdot 100\%$	Доля вымороженной влаги ω по результатам эксперимента, формула (10)	Расчетная доля вымороженной влаги ω_p , формула (3)	Относительная разница $\frac{\omega_p - \omega}{\omega_p} \cdot 100\%$
Массовая концентрация раствора ξ_w	Температура заморозания раствора t_3 , °C	Понижение температуры заморозания раствора Δt_3 , °C							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,025	-1,0	1,0	25,641	0,557	1,04	+3,85	0,000	0,000	0,00
0,048	-2,0	2,0	50,420	1,095	2,04	+1,96	0,492	0,500	+1,60
0,113	-5,0	5,0	127,396	2,766	5,14	+2,72	0,798	0,800	+0,25
0,164	-7,5	7,5	196,172	4,259	7,92	+5,30	0,869	0,867	-0,23
0,203	-10,6	10,6	254,705	5,529	10,28	-3,11	0,899	0,906	+0,77
0,267	-16,0	16,0	364,256	7,908	14,71	-8,77	0,930	0,938	+0,85
0,338	-23,6	23,6	510,574	11,084	20,62	-14,45	0,950	0,958	+0,83
0,390	-28,7	28,7	639,344	13,880	25,82	-11,15	0,960	0,965	+0,52
0,463	-33,9	33,9	862,198	18,718	34,72	+2,64	0,970	0,970	0,00
0,561	-41,0	41,0	1277,904	27,743	51,60	+20,54	0,980	0,976	-0,41
0,719	-51,3	51,3	2558,719	55,548	103,32	+50,35	0,990	0,981	-0,92

раствора и такой выбор аналога представляется нецелесообразным.

В табл. 2 представлены результаты расчета давлений водяных паров водного раствора этанола и активности воды, в зависимости от массовой концентрации раствора.

Представленные в табл. 2 данные показывают, что в диапазоне температур от -1,0 до -34,0 °C активность воды водного раствора этанола с понижением температуры уменьшается с 0,990 до 0,748. В среднем, уменьшение активности воды составляет 0,007 на каждый градус понижения температуры. В указанном диапазоне изменения активности воды прекращается рост дрожжей и плесневых грибов [12, 13]: сам показатель является одним из факторов барьерных технологий пищевых производств [14].

Выводы

1. Для определения активности воды в пищевых продуктах при различных температурах предложено использовать в качестве аналога тканевой влаги (сока) водный раствор этанола с его концентрацией 0,025.

2. На основе теории растворов получены расчетные данные по понижению температуры заморозания и доли вымороженной влаги в зависимости от концентрации раствора этанола. Их сопоставление с экспериментальными данными и расчетом по формуле Г. Б. Чижова для пищевых продуктов в диапазоне температур (-1÷-34) °C подтвердили обоснованность выбора аналога тканевой влаги (сока) для расчетов теплофизических процессов холодильной технологии пищевых продуктов.

3. На основе закона Рауля определена активность воды аналога тканевой влаги пищевых продуктов в за-

Таблица 2

Давление водяных паров на поверхности водного раствора этанола и активности воды

Table 2

Pressure of water vapors on the surface of ethyl alcohol water solution and water activity

Массовая концентрация раствора ξ_w	Температура заморозания раствора t_3 , °C	Моляльная доля этанола N_2	Давление насыщенного пара p_n , Па	Влагосодержание насыщенного водяного пара d_n , кг вл/кг св	Давление на поверхности раствора p_p , Па	Активность воды a_w
1	2	3	4	5	6	7
0,025	-1,0	0,010	562,086	3,516	556,465	0,990
0,048	-2,0	0,019	517,156	3,233	507,330	0,981
0,113	-5,0	0,047	401,033	2,504	382,184	0,953
0,164	-7,5	0,071	323,506	2,019	300,214	0,928
0,203	-10,6	0,091	246,166	1,535	223,765	0,909
0,267	-16,0	0,125	150,387	0,937	131,589	0,875
0,338	-23,6	0,166	65,061	0,451	54,261	0,834
0,330	-28,7	0,200	42,823	0,266	34,258	0,800
0,463	-33,9	0,252	24,394	0,155	18,247	0,748

висимости от температуры, которая в диапазоне ($-1 \div -34$) °С находится в пределах 0,990...0,748 и уменьшается в среднем на 0,007 на каждый градус понижения температуры.

4. Предложена методика расчета скорости усушки пищевого продукта в зависимости от активности воды, определяемой по аналогу тканевой влаги продукта в диапазоне промышленных температур холодильной технологии.

Литература

References

1. Головкин Н. А. Холодильная технология пищевых продуктов. — М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. 240 с.
2. Valdramidis V. Predictive microbiology. (Book Chapter). Modeling in Food Microbiology: From Predictive Microbiology to Exposure Assessment. 2016. P. 1–15.
3. Алямовский И. Г. Равновесная относительная влажность — гигротермическая характеристика пищевых продуктов. // Холодильная обработка и хранение пищевых продуктов: сб. научн. тр. — Л.: ЛТИХП, 1974. с. 148–152.
4. Эванс Дж. А. Замороженные пищевые продукты: производство и реализация (перевод с англ.) — СПб: Профессия, 2010. 440 с.
5. Богданов С. Н., Иванов О. П., Куприянова А. В. Холодильная техника. Свойства веществ: Справочник. — Л.: Машиностроение, 1976. 108 с.
6. Глинка Л. Н. Общая химия: учебное пособие для вузов. — Л.: Химия, 1982. 720 с.
7. Николаев Л. А., Тулупов В. А. Физическая химия: учебник для вузов. — М.: Высшая школа, 1967. 466 с.
8. Чижов Г. Б. Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов. — М.: Пищевая промышленность, 1979. 271 с.
9. Термофизические свойства водных растворов этанола. Таблица. VAG Мастерская [Электронный ресурс]: <http://forum.vagma.ru/topic/199-pri-kakoi-temperature-zamerzaet-vodka-spirit-vo/> (дата обращения: 17.06.2018).
10. Ковальская Л. П. и др. Технология пищевых продуктов. — М.: Колос, 1997. 752 с.
11. Фролов С. В., Куцакова В. Е., Кипнис В. Л. Тепло- и массообмен в расчетах процессов холодильной технологии пищевых продуктов. М.: Колос-Пресс, 2001. 144 с.
12. Lenovich L. M. Survival and death of microorganisms as influenced by water activity. (Book Chapter). Water Activity: Theory and Applications to Food. 2017, P. 119–136.
13. Dobson A. D. W. Yeasts and Molds: *Aspergillus flavus*. (Book Chapter). Encyclopedia of Dairy Sciences: Second Edition. 2011, P. 785–791.
14. Ким Г. Н., Сафронова Т. М. Барьерная технология переработки гидробийонтов. — Владивосток: Дальнаука, 2001. 166 с.
1. Golovkin N. A. Refrigeration technology of food products: textbook. Moscow, *Legkaya I pischevaya promyshlennost*, 1984. 240 p. (in Russian).
2. Valdramidis V. Predictive microbiology. (Book Chapter). Modeling in Food Microbiology: From Predictive Microbiology to Exposure Assessment. 2016. P. 1–15.
3. Alyamovskij I. G. Equilibrium relative humidity — hydrothermal characteristic of food products. *Holodil'naya obrabotka i hranenie pischvyh produktov*. Leningrad, 1974. pp. 148–152 (in Russian).
4. Evans J. A. Frozen food products: production and marketing (translation from English). St. Pt. Profession. 2010. 440 p.
5. Bogdanov S. N., Ivanov O. P., Kupriyнова A. V. Refrigeration equipment. Properties of substances: textbook. Leningrad, Mashinostroenie, 1976, 108 p. (in Russian).
6. Glinka Z. N. General Chemistry: Teaching manual for High School: textbook. Leningrad. Chemistry. 1982. 720 p. (in Russian).
7. Nikolaev L. A., Tulupov B. A., Physical Chemistry textbook for Higher school. Moscow, Higher School, 1967, 466 p. (in Russian).
8. Chizhov G. B. Thermophysical processes in refrigeration technology of food products: textbook. Moscow, Food industry, 1979. 271 p. (in Russian).
9. Thermophysical properties of aqueous ethanol solutions. Table. VAG Workshop [Electronic resource]: <http://forum.vagma.ru/topic/199-pri-kakoi-temperature-zamerzaet-vodka-spirit-vo/> (date accessed: 17.06.2018). (in Russian)
10. Kovalskaya L. P. et. al. Technology of food products. Textbook. Moscow, Kolos. 1997. 752 p. (in Russian)
11. Frolov S. V., Kutzakova V. E., Kipnis V. L., Thermal and mass exchange at calculating processes of refrigeration technology of food products: textbook. Moscow, Kolos press. 2001. 144 p. (in Russian).
12. Lenovich L. M. Survival and death of microorganisms as influenced by water activity. (Book Chapter). Water Activity: Theory and Applications to Food. 2017, P. 119–136.
13. Dobson A. D. W. Yeasts and Molds: *Aspergillus flavus*. (Book Chapter). Encyclopedia of Dairy Sciences: Second Edition. 2011, P. 785–791.
14. Kim G. N., Safronova T. M. Barrier technology of processing hydrobionts: textbook. Vladivostok, Dalnauka, 2001, 166 p. (in Russian).

Сведения об авторах

Information about authors

Эрлихман Владимир Наумович

д. т. н., профессор кафедры пищевых и холодильных машин Калининградского государственного технического университета, 236022, Россия, Калининград, Советский пр. 1, elina@klgtu.ru

Фатыхов Юрий Адгамович

д. т. н., профессор, заведующий кафедрой пищевых и холодильных машин Калининградского государственного технического университета, 236022, Россия, Калининград, Советский пр. 1, elina@klgtu.ru

Erlikhman Vladimir Naumovich

D. Sc., professor of the Department of Food and Refrigeration Machines of Kaliningrad State Technical University, 236022, Russia, Kaliningrad, Sovetskii av., 1, elina@klgtu.ru

Fatykhov Yuriy Adgamovich

D. Sc., professor, chair of the Department of Food and Refrigeration Machines of Kaliningrad State Technical University, 236022, Russia, Kaliningrad, Sovetskii av., 1, elina@klgtu.ru