

Учет активности воды в расчетах скорости усушки пищевого продукта

Владимир Н. Эрлихман¹ elina@klgtu.ruЮрий А. Фатыхов¹ yuriy.fatyhov@klgtu.ru¹ Калининградский государственный технический университет, Советский пр-т, 1, Калининград, 236022, Россия

Реферат. При холодильной обработке и хранении пищевого продукта происходят потери его массы вследствие усушки. Потери массы и качества пищевого продукта определяются температурными и влажностными параметрами окружающей среды и активностью воды самого продукта. Применение существующих формул для расчета тепломассообменных процессов холодильной обработки и хранения пищевых продуктов является ограниченным, так как они не учитывают активность воды и ее температурную зависимость от этого параметра. Получена формула для расчета скорости усушки пищевого продукта, учитывающая гигротермические и теплофизические параметры продукта и окружающей среды, а также условия тепломассообмена. В ней учтен технологический показатель «активность воды», с ростом которого скорость испарения влаги с поверхности продукта линейно возрастает. 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. Удовлетворительные результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных получены для диапазона температур (-1...-34)°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.

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

The account of water activity in the calculation of the rate of food product shrinkage

Vladimir N. Erlikhman¹ elina@klgtu.ruYuriy A. Fatykhov¹ yuriy.fatyhov@klgtu.ru¹ Kaliningrad State Technical University, Sovet av., 1, Kaliningrad, 236022, Russia

Summary. Refrigeration treatment and storing of the food product involves its mass loss due to its drying. The loss of mass and quality of food products is determined by ambient temperature and moisture parameters and water activity of the product itself. The use of existing formulas for calculating heat and mass exchange processes of refrigeration treatment and storage of food product is limited, because they don't take into account water activity and its temperature dependence on this parameter. A formula has been obtained for calculating the rate of food product shrinkage, considering the hygrothermal and thermophysical properties of the product and the environment, as well as the conditions for heat and mass transfer. The technological parameter of "water activity", with the increase of which the rate of evaporation of moisture from the product surface increases linearly, has been account in this formula. For determining dependence of food product water activity on temperature range within negative meaning it is suggested to use an analogue of tissue moisture possessing properties of diluted molecular solution. A criterion adequacy behavior of tissue moisture of food product and its analogue may be the share of frozen water. As analogue of tissue juice of food products the water solution of ethyl alcohol with mass concentration of 0.025 and temperature of freezing beginning -1°C is taken. Satisfactory results of comparing calculated and experimental data for temperature range of (-1...-34)°C have been obtained, which corresponds to industrial modes of buck food products refrigeration processes. Within this temperature range the water activity of water solution of ethyl alcohol drops with the temperature lowering from 0.990 to 0.748, in average amounts to water activity decrease of 0.007 to each degree of temperature drop.

Keywords: food product, drying speed, water activity, mass exchanging process, tissue moisture, analogue, ethyl alcohol

Введение

Влага в пищевых продуктах представляет собой сложные водные растворы солей, кислот, органических веществ. При холодильной обработке и хранении пищевого продукта происходят потери его массы вследствие усушки, а концентрация оставшегося в жидком состоянии раствора (тканевой влаги) по мере понижения температуры возрастает [1]. Потери массы и качества пищевого продукта определяются температурными и влажностными параметрами окружающей среды и активностью воды самого продукта. 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.

$$a_w = p_p / p''_n \quad (1)$$

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].

Процесс массоотдачи продукта описывается классическим уравнением [4]:

Для цитирования

Эрлихман В.Н., Фатыхов Ю.А. Учет активности воды в расчетах скорости усушки пищевого продукта // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 3. С. 18–21. doi:10.20914/2310-1202-2018-3-18-21

For citation

Erlikhman V.N., Fatykhov Yu.A. The account of water activity in the calculation of the rate of food product shrinkage. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2018. vol. 80. no. 3. pp. 18–21. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2018-3-18-21

$$W = \beta(\rho''_n - \rho_o) F \frac{101,3 \times 10^3}{p_\delta}, \quad (2)$$

где β – коэффициент массоотдачи (испарения), м/с; ρ''_n, ρ_o – объемная массовая концентрация (плотность) насыщенного водяного пара на поверхности продукта и, соответственно, водяного пара в окружающем воздухе, кг вл/м³; F – поверхность теплообмена, м²; p_δ – барометрическое давление, Па.

Для расчета скорости испарения влаги W также применяют формулу:

$$W = \beta_p (\rho''_n - \rho_o) F \frac{101,3 \times 10^3}{p_\delta} = \frac{\beta}{R_n - T_n} (p''_n - p_o) F \frac{101,3 \times 10^3}{p_\delta}, \quad (3)$$

где β_p – коэффициент испарения, отнесенный к разности давлений насыщенного водяного пара на поверхности продукта p''_n и в окружающем воздухе p_o с температурой T_o , кг вл/(м²·с·Па) и равный

$$\beta_p = \frac{\beta}{R_n - T_n}, \quad (4)$$

где R_n – газовая постоянная водяного пара, равная $R_n = 461,6$ Дж / (кг вл. К); T_n – температура поверхности продукта, К.

Формула (3) получена из выражения (2) путем представления плотности водяного пара ρ''_n и ρ_o из уравнения состояния Клапейрона–Менделеева

$$\rho''_n = \frac{p''_n}{R_n T_n}, \quad (5)$$

$$\rho_o = \frac{p_o}{R_n T_n}, \quad (6)$$

и внесением величины $\frac{1}{R_n T_n}$ за скобки выражения (3).

Так как температура водяного пара в окружающем воздухе T_o в общем случае не равна температуре продукта T_n , то его плотность равна

$$\rho_o = \frac{p_o}{R_n T_o}. \quad (7)$$

Поэтому более точной формулой для расчета скорости испарения влаги является

$$W = \frac{\beta}{R_n - T_n} \left(p''_n - \frac{T_n}{T_o} p_o \right) F \frac{101,3 \times 10^3}{p_\delta} = \beta_p \left(p''_n - \frac{T_n}{T_o} p_o \right) F \frac{101,3 \times 10^3}{p_\delta}. \quad (8)$$

Применение формул (2) и (3) для расчета теплообменных процессов холодильной обработки и хранения пищевых продуктов является ограниченным, так как они не учитывают активность воды c_w и ее температурную зависимость от этого параметра.

Цель исследования заключается в установлении зависимости скорости испарения влаги из пищевого продукта при различных температурах холодильной обработки и хранения с учетом гигротермических параметров окружающей среды, интенсивности тепло- и массообмена и активности воды.

Результаты и обсуждение

Представим формулу (8) с учетом выражения (1) в следующем виде:

$$W = \beta_p \left(a_w p''_n - \frac{T_n}{T_o} p_o \right) F \frac{101,3 \times 10^3}{p_\delta}. \quad (9)$$

После вынесения величины a_w за скобки и представления давлений p''_n и p_o через их плотности (формулы 5 и 7), формула (9) примет вид:

$$W = \beta_p a_w R_n T_n \left(p''_n - \frac{1}{a_w} p_o \right) F \frac{101,3 \times 10^3}{p_\delta}. \quad (10)$$

Учитывая, согласно формуле (4), что

$$\beta_p R_n T_n = \beta, \text{ а } p_o = \varphi_o p''_o,$$

где φ_o и p''_o – относительная влажность и давление насыщенных водяных паров окружающего воздуха, а также разделив и умножив правую часть уравнения (10) на плотность сухого воздуха ρ_{cn} при температуре поверхности продукта:

$$\rho_{cn} = \frac{p_{cn}}{R_c T_n}, \quad (11)$$

где p_{cn} – парциальное давление сухого воздуха на поверхности продукта, равное $p_{cn} = p_\delta - p''_n$, Па; R_c – газовая постоянная сухого воздуха, равная 287 Дж / (кг св К), получим

$$W = \beta \rho_c a_w \left(\frac{p''_n}{\rho_{cn}} - \frac{1}{a_w} 0,622 \frac{T_n}{T_o} \frac{\varphi_o p''_o}{p_\delta - p''_n} \right) \times \times F \frac{101,3 \times 10^3}{p_\delta}. \quad (12)$$

В выражении (12) отношение $\frac{p''_n}{\rho_{cn}}$ представляет собой влагосодержание насыщенного воздуха на поверхности продукта d''_n , а произведение $\beta \rho_c$ – коэффициент массоотдачи σ (кг св/м²), отнесенный к разности влагосодержаний.

Используя уравнение Льюиса, связывающего тепло и массообмен

$$\frac{\alpha}{\sigma} = c_c, \quad (13)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); c_c – удельная массовая теплоемкость сухого воздуха, равная в диапазоне температур -50...+30°C $1,006 \times 10^3$ Дж/(кг св К), формула (12) в окончательном варианте примет вид

$$W = \frac{\alpha}{c_c} a_w \left(d''_n - \frac{1}{a_w} 0,622 \frac{T_n}{T_o} \frac{\varphi_o p''_o}{p_\delta - p''_n} \right) \times \times F \frac{101,3 \times 10^3}{p_\delta}. \quad (14)$$

Выражение (14) отражает зависимость скорости усушки продукта W от активности воды a_w и температуры продукта T_n , а также от условий теплообмена, учитываемых теплофизическими и гигротермическими параметрами окружающей среды α , c_c , φ_o , d_o , T_o .

В таблице 1 представлены результаты расчета скорости испарения влаги с одного квадратного метра продукта (поверхности теплообмена), полученные по зависимости (14) для следующих условий: при параметрах окружающего воздуха $p_\delta = 100 \times 10^3$ Па, $T_o = 273$ К, $\varphi_o = 0,9$, $p''_o = 610,8$ Па, а также при $T_n = 278$ К, $d''_n = 10,783 \times 10^{-3}$ кг вл/кг св, $p''_n = 1704,1$ Па, $\alpha = 10,0$ Вт/(м²·К).

Таблица 1.

Скорость испарения влаги в зависимости от активности воды

Table 1.

Evaporation rate of moisture depending on water activity

Активность воды (Water activity) a_w	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98	1,0
Скорость испарения (Evaporation rate) $W \times 10^5$, кг вл/(с×м ²)	6,446	6,664	6,880	7,097	7,315	7,532
Относительная скорость испарения (Relative evaporation rate) $W / W_{a_w} = 1$	0,856	0,885	0,914	0,942	0,971	1,0

Из представленных в таблице 1 данных видно, что в диапазоне изменения активности воды, представляющем практический интерес как барьерный фактор [2, 3], с ростом этого показателя скорость испарения влаги и усушки продукта возрастает и эта зависимость имеет линейный характер.

По расчетной зависимости (14) можно получить также значение активности воды ($a_w = 0,306$), при котором испарение влаги и усушка продукта прекращается ($W = 0$). Это означает, что для принятых в примере гигротермических и теплофизических условий хранения продукт достиг равновесной влажности.

Предложенная формула (14), также, как и существующие формулы для расчета массообменных процессов при холодильной обработке и хранении пищевых продуктов [5–7], 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 [1], вследствие фазового превращения части влаги в лед, увеличивает свою концентрацию, при этом активность воды уменьшается. Так как для большинства пищевых продуктов зависимость активности воды 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 такая закономерность достоверно устанавливается на основании теории растворов.

В качестве аналога тканевых соков пищевых продуктов нами [8] принят водный раствор этанола с массовой концентрацией 0,025 и температурой начала замерзания (-1)°C, присущей большинству пищевых продуктов. Критерием адекватности поведения тканевой влаги пищевого продукта и его аналога выбран такой показатель, как доля вымороженной влаги, определяемой по известной формуле Г.Б. Чинова. Для определения расчетной и экспериментальной зависимостей температуры замерзания водного раствора этанола от концентрации в качестве последней принята зависимость по источнику [9].

Установлен диапазон температур, в котором расхождения в долях вымороженной влаги между расчетными и экспериментальными данными не превышает 1,6%. Этот диапазон составляет (-1...-34)°C и соответствует промышленным режимам холодильной обработки и хранения подавляющего большинства пищевых продуктов.

В указанном температурном диапазоне активность воды водного раствора этанола с понижением температуры уменьшается с 0,990 до 0,748: в среднем на величину 0,007 на каждый градус понижения температуры.

По своей физической природе этанол (одно из названий синтетического спирта, этилового спирта, просто спирта и др.) является продуктом переработки, в том числе, крахмало- и сахаросодержащих пищевых продуктов [10],

что только подтверждает правомочность и оправданность его выбора в качестве аналога тканевой влаги пищевого продукта.

Выводы

1. Предложена формула для определения скорости испарения влаги из пищевых продуктов при их холодильной обработке и хранении, учитывающая активность воды, интенсивность теплообмена и гигротермические параметры окружающей среды.

2. Показано, что в диапазоне изменения активности воды от 0,9 до 1,0, имеющем практическое значение, с ее ростом скорость испарения

влаги с поверхности продукта возрастает и эта зависимость имеет линейный характер.

3. Для определения активности воды в пищевых продуктах при различных температурах холодильной обработки и хранения предложено использовать в качестве аналога тканевой влаги водные раствор этанола с концентрацией 0,025 и температурой начала замерзания (+1)°C.

4. Установлен диапазон температур (-1...-34)°C, в котором при расчете скорости усушки пищевого продукта в зависимости от активности воды правомочно и с приемлемой точностью может использоваться аналог тканевой влаги пищевого продукта.

2 Soruor H., Tanaka F., Uchino T. Impact of non-thermal processing on the microbial and bioactive content of foods. Global Journal of Biology, Agriculture and Health Sciences. 2014. no. 3(1). pp.153-167.

3 Kim G.N., Safronova T.M. Bar'ernaya tekhnologiya pererabotki gidrobiontov [Barrier technology of processing hydrobionts]. Vladivostok, Dalnauka, 2001. 166 p. (in Russian).

4 Frolov S.V., Kutzakova V.E., Kipnis V.L. Termo- i massoobmen v raschetah processov holodil'noy tekhnologii pishchevyykh produktov [Thermal and mass exchange at calculating processes of refrigeration technology of food products]. Moscow, Kolos-Press, 2001. 144 p. (in Russian).

5 Sabarez H.T. Modelling of drying processes for food materials. Modeling Food Processing Operations, Woodhead Publishing. 2015. pp. 95-123.

6 Aevans J.A. Zamorozhennyye pishchevyye produkty: proizvodstvo i realizatsiya (translation from English) [Frozen food products: production and marketing]. Saint-Petersburg, Professiya, 2010. 440 p. (in Russian).

7 Zorrilla S.E., Rubiolo A.C. Mathematical modeling for immersion chilling and freezing of foods. Part 1: Model development. J. of Food Engineering. 2005. no. 66. pp. 329-338.

8 Erlikhman V.N., Fatykhov J.A. Calculation method of food product drying speed depending on water activity in the processes of refrigeration technology. Vestnik MAH [Bulletin of MAC] 2018. no 4. (in Russian).

9 Tabliza. Termofizicheskie svoystva etanola [Table. Thermophysical properties of ethyl alcohol] Available at: <http://forum.vagma.ru/topic/199-pri-kakoi-temperature-zamerzaet-vodka-spirit-vo/> (in Russian)

10 Fikiin K., Tsvetkov O., Laptev Ju., Kolodyaznaya V. Termophysical and engineering issues of the immersion freezing of fruits in ice slarries based on sugar-ethanol aqueous solution. Ecolibrium. 2003. pp.10-14.

ЛИТЕРАТУРА

1 Berk Z. Food process engineering and technology (Third edition). Academic Press, 2018. 690 p.

2 Soruor H., Tanaka F., Uchino T. Impact of non-thermal processing on the microbial and bioactive content of foods // Global Journal of Biology, Agriculture and Health Sciences. 2014. №3(1). P.153-167.

3 Ким Г.Н., Сафронова Т.А. Барьерная технология переработки гидробionтов. Владивосток: Дальнаука, 2001. 166 с.

4 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.

5 Sabarez H.T. Modelling of drying processes for food materials // Modeling Food Processing Operations, Woodhead Publishing. 2015. P. 95-123.

6 Эванс Дж.А. Замороженные пищевые продукты: производство и реализация (перевод с англ.). СПб: Профессия, 2010. 440 с.

7 Zorrilla S.E., Rubiolo A.C. Mathematical modeling for immersion chilling and freezing of foods. Part 1: Model development // J. of Food Engineering. 2005. №66. P.329-338.

8 Эрлихман В.Н., Фатыхов Ю.А. Методика расчета скорости усушки пищевого продукта в зависимости от активности воды в процессах холодильной технологии // Вестник МАХ. 2018. № 4.

9 Таблица. Термодинамические свойства этанола – ГСМ-VAG Мастерская. URL: <http://forum.vagma.ru/topic/199-pri-kakoi-temperature-zamerzaet-vodka-spirit-vo>.

10 Fikiin K., Tsvetkov O., Laptev Ju., Kolodyaznaya V. Termophysical and engineering issues of the immersion freezing of fruits in ice slarries based on sugar-ethanol aqueous solution // Ecolibrium. 2003. P.10-14.

REFERENCES

1 Berk Z. Food process engineering and technology (Third edition). Academic Press, 2018. 690 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Владимир Н. Эрлихман д.т.н., профессор, кафедра пищевых и холодильных машин, Калининградский государственный технический университет, Советский пр-т, 1, Калининград, 236022, Россия, elina@klgtu.ru

Юрий А. Фатыхов д.т.н., профессор, зав. кафедрой, кафедра пищевых и холодильных машин, Калининградский государственный технический университет, Советский пр-т, 1, Калининград, 236022, Россия, yuriy.fatykhov@klgtu.ru

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Владимир Н. Эрлихман обзор литературных источников по исследуемой проблеме, выполнил расчёты

Юрий А. Фатыхов написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несёт ответственность за плагиат

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 15.05.2018

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 03.08.2018

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Vladimir N. Erlikhman Dr. Sci. (Engin.), professor, food and refrigeration machines department, Kaliningrad State Technical University, Sovet av., 1, Kaliningrad, 236022, Russia, elina@klgtu.ru

Yuriy A. Fatykhov Dr. Sci. (Engin.), professor, food and refrigeration machines department, Kaliningrad State Technical University, Sovet av., 1, Kaliningrad, 236022, Russia, yuriy.fatykhov@klgtu.ru

CONTRIBUTION

Vladimir N. Erlikhman review of the literature on an investigated problem, performed computations

Yuriy A. Fatykhov wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 5.15.2018

ACCEPTED 8.3.2018