

Влияние связанной воды на ее активность при замораживании продуктов

Д-р техн. наук **В.Н. Эрлихман**, elina@klgtu.ru
 д-р техн. наук **Ю.А. Фатыхов**, yuriy.fatyhov@klgtu.ru
*Калининградский государственный технический университет
 236022, Россия, Калининград, Советский пр., 1*

Разработан расчетный метод определения активности воды в пищевых продуктах для температур ниже начала замерзания при учете денатурации белков и соответствующей ей дегидратации связанной воды и ее поступления в раствор тканевых соков. Обоснована возможность использования в расчетах в качестве аналога тканевых соков водного раствора этанола. Приняты в качестве характеристик, отражающих физико-химические особенности продукта, температура начала замерзания $t_{нз}$, определяемая начальной концентрацией раствора этанола, относительное содержание связанной воды от количества сухих веществ σ и общей влаги растворителя и связанной воды по отношению к массе продукта W . В классическую формулу активности воды, известную из теории растворов, введена корректировка, учитывающая дополнительное поступление связанной воды в раствор тканевых соков из-за дегидратации белков при их денатурации. Получены выражения определения массы связанной воды при температурах, равной или выше начала замерзания, перевода относительного содержания связанной воды от общей массы воды в продукте в содержание связанной воды от массы воды растворителя. Выполнен пример расчета активности воды для условного продукта животного происхождения с $t_{нз} = -1^\circ\text{C}$; $W = 0,8$ и использованием усредненной величины $\sigma = 0,27$ кг сз/кг с, полученной Д.Г. Рютовым, а также экспериментальных результатов С. Чарма и П. Муди по относительному содержанию связанной воды от общей массы воды при температурах ниже начала замерзания. Получено, что активность воды в диапазоне температур от -1 до -40°C уменьшается на 25%, и ее уменьшение не пропорционально понижению температуры. Наибольшее сокращение активности воды на 85% имеет место в диапазоне температур от $-1,0$ до $-6,7^\circ\text{C}$, когда происходит основное льдообразование и доля вымороженной влаги составляет ~84%. Поступление связанной воды в раствор тканевых соков из-за дегидратации белков не оказывает существенного влияния на активность воды в продукте. Ее увеличение составляет в среднем 0,9% по сравнению с идеальным вариантом отсутствия дегидратации при замораживании продуктов.

Ключевые слова: массообменный процесс; замораживание; активность воды; связанная вода; пищевой продукт.

DOI: 10.17586/2310-1164-2018-11-4-36-41

Influence of pure solute on its activity during refrigeration of products

D. Sc. **Vladimir N. Erlikhman**, elina@klgtu.ru
 D. Sc. **Yuri A. Fatykhov**, yuriy.fatyhov@klgtu.ru
*Kaliningrad State Technical University,
 1, Sovetsky ave., Kaliningrad, 236022, Russia*

A calculation method for determining water activity in food products at the temperatures below freezing point taking into account protein denaturation and dehydration of pure solute accompanying it and its penetration into solution of tissue juices is presented. It was proved that it is possible to use ethanol water solution as an analogue of tissue juices when making calculations. The temperature of starting freezing t_{st} determined by initial ethanol solution concentration, relative contents of pure solute against quantity of dry matter σ , and common moisture of solution and pure solute in relation to product weight W have been accepted as the characteristics reflecting physics-chemical product peculiarities. The classic formula of water activity familiar from the theory of solutions has been modified by a correction which takes into account additional ingress of pure solute into solution of tissue juices due to proteins dehydrogenation at their denaturation. Expressions for determining pure solute mass at the temperatures equal or above freezing point, transition of relative pure solute contents from general water mass in product into contents of pure solute from solution water mass. An example of calculating water activity for conventional product of animal origin with $t_{st} = -1^\circ\text{C}$; $W = 0,8$, and the ingress use of averaged magnitude $\sigma = 0.27$ kg c/kg m obtained by D.G. Rjutov, and also experimental results by S. Charma and P. Mudi for relative content of pure solute from general water mass at the temperatures below the start of freezing are exemplified. It has been found out that water activity at the temperatures from -1 to -40°C diminishes

by 25% and its diminishing is not proportional to the temperature drop. The greatest drop of water activity up to 85% takes place at the temperature range from -1.0 to -6.7°C when basic ice formation takes place and the share of frozen out moisture is $\sim 84\%$. The ingress of pure solute into solution of tissue juices due to protein denaturation does not influence much the water activity in the product. Its increase amounts on average to 0.9% in comparison with an ideal variant of denaturation absence during refrigeration of products.

Keywords: mass exchanging process; freezing; water activity; pure solute; food product.

Введение

Связанная вода в продуктах при их замораживании и хранении вследствие денатурации белков переходит в тканевые соки, что приводит к изменению первоначальной активности воды. В свою очередь активность воды определяет микробиологическую стойкость и естественные потери из-за усушки продукта при их холодильной обработке и хранении [1–3].

Данные по содержанию связанной воды и ее активности a_w для разных продуктов при различных отрицательных температурах, а также их количественным изменениям в процессе замораживания малочисленны из-за их разнообразия и сложности экспериментального определения. К ограниченному числу наиболее известных относятся исследования, результаты которых опубликованы в работах [4–6].

Содержание связанной воды $m_{сз}$ на килограмм общей массы воды $m_{в}$, включающей массу связанной воды $m_{сз}$ и воду растворитель $m_{вр}$ для рыб разных видов составляет $\frac{m_{сз}}{m_{в}} = 0,068 \dots 0,113 \frac{\text{кг сз}}{\text{кг в}}$. Д.Г. Рютовым по экспериментальным результатам Л. Риделя установлено, что для продуктов животного происхождения содержание связанной воды на единицу массы сухой части продукта m_c в среднем составляет $\sigma = 0,27 \frac{\text{кг сз}}{\text{кг с}}$, а для продуктов растительного происхождения $\sigma = 0,12 \frac{\text{кг сз}}{\text{кг с}}$.

С. Чарма и П. Муди экспериментально определили содержание связанной воды от общей массы воды $\left(\frac{m_{сз}}{m_{в}}\right)_{t_i}$ для различных температур при замораживании мышечной ткани пикши [4, 7]. Результаты их исследований представлены в виде таблицы в монографии Г.Б. Чиждова [4] и математически с погрешностью, не превышающей $8,8\%$, описываются полученной нами формулой

$$\frac{m_{сз}}{m_{в}} = 0,360 \left(\frac{t_{нз}}{t_i} \right)^{0,0865} - 0,149, \quad (1)$$

где $t_{нз}$ – температура начала замерзания тканевых соков продукта, $^{\circ}\text{C}$;

t_i – температура продукта при $t_i < t_{нз}$.

В связи с практическим отсутствием достаточных данных по количеству связанной воды и ее влиянию на активность воды в различных продуктах при разных температурах, целью работы явилась разработка методики их расчетного определения.

Методика

Методика базируется на допущении возможности применения в качестве аналога тканевых соков продукта водного раствора этанола [8, 9].

Возможность этого допущения подтверждают результаты расчетов понижения температуры замерзания и доли вымороженной воды в водном растворе этанола в зависимости от концентрации и температуры. Они показывают, что в диапазоне температур $-1 \dots -34^{\circ}\text{C}$ раствор этанола подчиняется закономерностям, действительным для слабых недиссоциированных растворов, а по доле вымороженной воды практически не отличаются от рассчитанных по формуле Г.Б. Чиждова. Расхождение между ними не превышает $1,6\%$.

Аналогия тканевых соков продуктов с водным раствором этанола следует из того, что значительный объем этанола получают в результате переработки зерновых культур, овощей, фруктов и другого сырья, используемого в пищевых производствах.

Методика заключалась в сравнении результатов расчета активности воды для $t_i \leq t_{нз}$, с учетом денатурации белков и поступления при этом связанной воды в раствор, т.е. его разбавления и без него.

За основные характеристики продукта, отражающие его физико-химические особенности, приняты $t_{\text{нз}}$, относительное общее содержание влаги W , сухих веществ C и связанной воды по отношению к сухим веществам σ при $t \geq t_{\text{нз}}$

$$W = \frac{m_{\text{в}}}{m_{\text{пр}}} = \frac{m_{\text{сз}} + m_{\text{впр}}}{m_{\text{пр}}}, \tag{2}$$

$$C = \frac{m_{\text{с}}}{m_{\text{пр}}} = \frac{m_{\text{пр}} + m_{\text{в}}}{m_{\text{пр}}} = 1 - W, \tag{3}$$

$$\sigma = \frac{m_{\text{сз}}}{m_{\text{с}}}, \tag{4}$$

где $m_{\text{пр}}$ – масса продукта.

Для расчета активности воды в растворе и мольной доли растворенного вещества, в данном случае этанола, были использованы известные формулы для активности воды

$$a_w = \frac{p_{\text{р}}}{p''}, \tag{5}$$

для мольной доли растворенных веществ

$$N_{\text{э}} = \frac{p'' - p_{\text{р}}}{p''} = \frac{\frac{m_{\text{э}}}{\mu_{\text{э}}}}{\frac{m_{\text{э}}}{\mu_{\text{э}}} + \frac{m_{\text{впр}}}{\mu_{\text{в}}}}, \tag{6}$$

где $p_{\text{р}}$ и p'' – давление водяных паров над раствором и насыщенных водяных паров при той же температуре;

$m_{\text{э}}$ – масса этанола в растворе;

$\mu_{\text{э}}$ и $\mu_{\text{в}}$ – молекулярные массы этанола и воды, равные соответственно $\mu_{\text{э}} = 46,063$ и $\mu_{\text{в}} = 18,01$.

Из выражений (5) и (6) следует, что активность воды определяется формулой

$$a_w = 1 - N_{\text{э}} = \frac{\frac{m_{\text{впр}}}{\mu_{\text{в}}}}{\frac{m_{\text{впр}}}{\mu_{\text{в}}} + \frac{m_{\text{э}}}{\mu_{\text{э}}}}. \tag{7}$$

Для учета того, что в процессе замораживания часть связанной воды из-за денатурации белков в количестве, зависящем от температуры t_i , $\Delta m_{\text{сз}}(t_i)$ поступает в раствор, в формулу (7) введено дополнение и она примет вид

$$a_w(t_i) = 1 - N_{\text{э}}(t_i) = \frac{\frac{m_{\text{впр}} + \Delta m_{\text{сз}}(t_i)}{\mu_{\text{в}}}}{\frac{m_{\text{впр}} + \Delta m_{\text{сз}}(t_i)}{\mu_{\text{в}}} + \frac{m_{\text{э}}}{\mu_{\text{э}}}}. \tag{8}$$

Определение массы этанола в растворе на 1000 г воды растворителя для принятых $t_{\text{нз}}$ и $t_i < t_{\text{нз}}$ выполняли по известной формуле для вычисления понижения температуры замерзания слабых недиссоциированных растворов по сравнению с температурой замерзания растворителя (воды)

$$\Delta t_i = K \frac{m_{\text{э}}(t_i)}{\mu_{\text{э}}}, \tag{9}$$

где K – криоскопическая постоянная, равная для воды 1,86.

В дальнейшем величины, необходимые для расчетов, определяли на массу воды растворителя $m_{\text{впр}} = 1000$ г.

Определение массы связанной воды, поступающей в раствор на 1000 г воды растворителя при температурах $t_i \leq t_{\text{нз}}$, $\Delta m_{\text{сз}}(t_i)$ выполнены с использованием данных С. Чарли и П. Муди по относительному содержанию связанной воды от общего содержания воды в продукте $\left(\frac{m_{\text{сз}}}{m_{\text{в}}}\right)_{t_i}$.

С целью перевода относительного содержания связанной воды от общего содержания воды в относительное содержание связанной воды от воды растворителя $\left(\frac{m_{\text{сз}}}{m_{\text{впр}}}\right)_{t_i}$ получены следующие формулы.

Из совместного решения выражений (2), (3) и (4) для температур $t \geq t_{\text{нз}}$ установлена зависимость относительного содержания связанной воды от общего содержания воды в продукте в зависимости от его химического состава

$$\frac{m_{\text{сз}}}{m_{\text{в}}} = \frac{\sigma(1-W)}{W}. \tag{10}$$

Учитывая, что сумма долей связанной воды и воды растворителя по отношению к общей массе в продукте

$$\frac{m_{сз}}{m_{в}} + \frac{m_{вр}}{m_{в}} = 1, \tag{11}$$

и используя формулы (10) и (11), нетрудно получить выражения для определения массы связанной воды и соотношение между массой связанной воды и водой растворителем, которые для принятой массы воды растворителя $m_{вр} = 1000$ г имеют следующий вид

$$m_{сз} = m_{в} - m_{вр} = m_{вр} \frac{\sigma(1-W)}{W-\sigma(1-W)} = 1000 \frac{\sigma(1-W)}{W-\sigma(1-W)}, \tag{12}$$

$$\frac{m_{сз}}{m_{вр}} = \frac{\sigma(1-W)}{W-\sigma(1-W)}. \tag{13}$$

Совместное решение выражений (10) и (13) позволяет определить для $t_i \leq t_{нз}$ относительное содержание связанной воды от воды растворителя в зависимости от относительного содержания связанной воды τ общего содержания воды

$$\left(\frac{m_{сз}}{m_{вр}}\right)_{t_i} = \left(\frac{m_{сз}}{m_{в}}\right)_{t_i} \frac{W}{W-\sigma(1-W)}. \tag{14}$$

Из выражения (14) следует, что масса связанной воды на 1000г воды растворителя составит

$$(m_{сз})_{t_i} = 1000 \left(\frac{m_{сз}}{m_{в}}\right)_{t_i} \frac{W}{W-\sigma(1-W)}. \tag{15}$$

Массу связанной воды, поступающей в раствор из-за денатурации белков при температуре $t_i \leq t_{нз}$, определяли по выражению

$$\Delta m_{сз}(t_i) = m_{сз}(t_{нз}) - m_{сз}(t_i). \tag{16}$$

Результаты и их обсуждение

Влияние поступления связанной воды в раствор тканевых соков при температуре $t_i < t_{нз}$ рассмотрим на примере условного продукта животного происхождения $\sigma = 0,27$, с относительным содержанием влаги $W = 0,8$ и температурой начала замерзания $t_{нз} = -1^\circ\text{C}$ [10, 11].

Для принятого примера при температуре продукта $t \geq t_{нз}$

– масса этанола в водном растворе на $m_{вр} = 1000$ г воды растворителя согласно формуле (9)

$$m_{э} = \Delta t \frac{\mu_{э}}{K} = 1 \cdot \frac{46,0,63}{18,010} = 24,765 \text{ г/1000г вр,}$$

– активность воды по формуле (8)

$$a_w = \frac{\frac{m_{вр}}{\mu_{в}}}{\frac{m_{вр}}{\mu_{в}} + \frac{m_{э}}{\mu_{э}}} = \frac{\frac{1000}{18,010}}{\frac{1000}{18,010} + \frac{24,765}{46,063}} = 0,990.$$

– масса связанной воды по формуле (15)

$$m_{сз} = 1000 \frac{\sigma(1-W)}{W-\sigma(1-W)} = 1000 \frac{0,27(1-0,8)}{0,8-0,27(1-0,8)} = 72,4 \text{ г/1000 г вр.}$$

Результаты расчетов активности воды при температурах $t_i \leq t_{нз}$ представлены в таблице, в которой температуры и соответствующее им содержание связанной воды от общего количества воды приняты по результатам исследований С. Чарма и П. Муди и практически соответствуют рассчитанным по формуле (1).

Перевод относительного содержания связанной воды от общего количества воды в содержание связанной воды от количества воды растворителя произведен по формуле (14). Масса связанной воды, поступающей в тканевые соки, определена по выражению (15).

Активность воды без учета поступления связанной воды в раствор a_w и с учетом $a_w(t_i)$ рассчитаны по формулам (7) и (8) соответственно.

Результаты расчетов (таблица) показывают, что основное поступление связанной воды в тканевые соки продукта имеет место в интервале температур от начала замерзания до $-6,7^\circ\text{C}$, которое составляет 84% от ее поступления при замораживании продукта до -40°C . Это соответствует температурному диапазону наибольшего льдообразования [12, 13]. По формуле Г.Б. Чицова доля вымороженной влаги при $-6,7^\circ\text{C}$ составляет 0,85. С понижением температуры продукта от -1 до -40°C активность воды уменьшается с 0,990 до 0,743, т.е. на ~25% и в среднем составляет $0,6 \cdot 10^{-2}$ единиц на каждый градус. Темп снижения активности воды с понижением температуры не является равномерным. Он уменьшается

с понижением температуры [14, 15]. Так при снижении температуры от $-1,0$ до $-6,7^{\circ}\text{C}$, т.е. на $5,7^{\circ}\text{C}$, активность воды сокращается на $4,8 \cdot 10^{-2}$ единиц, а от $-34,4$ до $-40,0^{\circ}\text{C}$, т.е. на $5,6^{\circ}\text{C}$, сокращение активности в 2,8 раза меньше и составляет $1,7 \cdot 10^{-2}$ единиц.

Таблица – Масса связанной воды и активность воды

Table – Mass of pure solute and water activity

Температура t , $^{\circ}\text{C}$	Масса этанола в растворе на 1000 г воды растворителя $m_3(t_i)$ формула (9)	Относительное содержание связанной воды от общего количества воды $\left(\frac{m_{cs}}{m_b}\right)_{t_i}$	Относительное содержание связанной воды от воды растворителя $\left(\frac{m_{cs}}{m_b}\right)_{t_i}$ формула (13)	Масса связанной воды на 1000 г воды растворителя $m_{cs}(t_i)$, г формула (15)	Масса связанной воды, поступившей в раствор, на 1000 г воды растворителя формула (15)	Активность воды	
						без учета поступления связанной воды в раствор a_w формула (7)	С учетом поступления связанной воды в раствор $a_w(t_i)$ формула (8)
$t \geq t_{нз}$	24,765			72,40		0,990	0,990
-6,7	165,926	0,148	0,159	11,51	60,89	0,939	0,942
-12,2	302,133	0,142	0,153	11,08	61,32	0,894	0,900
-17,8	440,817	0,140	0,150	10,86	61,54	0,853	0,860
-23,3	577,025	0,137	0,147	10,64	61,76	0,816	0,825
-28,9	715,709	0,125	0,134	9,94	62,46	0,782	0,792
-34,4	851,916	0,115	0,124	9,20	63,20	0,750	0,760
-40,0	990,600	0,110	0,118	8,76	63,64	0,732	0,743

Влияние поступления связанной воды в тканевые соки продукта на активность воды незначительно. Сравнение активности воды без учета и с учетом поступления связанной воды показывает, что с понижением при температуре продукта $-6,7^{\circ}\text{C}$ она увеличивается на 0,3% и при -40°C на 1,5%, что в среднем составляет менее 1%.

Выводы

1. Разработана методика расчетного определения активности воды в продуктах при температурах ниже начала замерзания тканевых слоев по их аналогу, за который принят водный раствор этанола. Методика базируется на знании температуры начала замерзания продукта, относительного содержания воды и связанной воды, приходящейся на единицу массы сухих веществ при температуре выше начала замерзания.
2. Получена математическая зависимость для определения относительного содержания связанной воды от общей массы воды в продукте в зависимости от температуры начала замерзания.
3. Основное поступление связанной воды в тканевые соки продукта наблюдается в интервале температур от начала замерзания до $-6,7^{\circ}\text{C}$ и составляет 84%, что соответствует температурному диапазону наибольшего льдообразования.
4. Понижение температуры продукта до -40°C уменьшает активность воды на ~25%.
5. Поступление связанной воды в тканевые соки продукта из-за дегидратации белков при их денатурации не показывает существенного влияния на активность воды.

Литература

1. Бараненко А.В., Куцакова В.Е., Борзенко Е.И., Фролов С.В. Холодильная технология пищевых продуктов. Часть 1. Теплофизические основы. СПб.: ГИОРД. 2007. 224 с.
2. Handbook of Frozen Food Processing and Packaging. In ed. D.W. Sun. CRC Press, Boca Raton. 2016, 936 p.
3. Varzakas T., Tzia C. Handbook of Food Processing Food Preservation. CRC Press. 2016. 705 p.
4. Чижов Г.Б. Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность. 1979. 271 с.
5. Berk Z. Food process engineering and technology. Academic Press. 2018. 690 p.
6. Syamaladevi R., Tang Ju., Villa-Rojas R., Sablani Sh., Carter B., Campbell G. Influence of Water Activity on Thermal Resistance of Microorganisms in Low-Moisture Foods: A Review. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2016, no. 15(2), pp. 353–370.

7. *Рогов И.А., Бабакин Б.С., Фатыхов Ю.А.* Криосепарация сырья биологического происхождения. Рязань: Наше время. 2005. 288с.
8. *Эрлихман В.Н., Фатыхов Ю.А.* Учет активности воды в расчетах скорости усушки пищевого продукта // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2018. Т.80. №3. С. 18–21.
9. *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.
10. *Эванс Дж.А.* Замороженные пищевые продукты: производство и реализация. СПб.: Профессия, 2010. 440 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. *Xiao Z., Lai Yu., Zang M.* Study on the freezing temperature of saline soil. *Acta Geotechnica*. 2018, V. 13, Is. 1, pp. 195–205.
13. *Kirby R., Bartram J., Carr R.* Water in food production and processing: Quantity and quality concerns. *Food Control*. 2003, no. 14(5), pp. 283–299.
14. *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.
15. *Baron C.P., Kjaersgard I.V.H., Jessen F., Jacobsen C.* Protein and lipid oxidation during frozen storage of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2007, no. 55(20), pp. 8118–8125.

References

1. *Baranenko A.V., Kutzakova V.E., Borzenko E.I., Frolov S.V.* *Kholodil'naya tekhnologiya pishcheykh produktov. Chast' 1. Teplofizicheskie osnovy* [Refrigeration technology of food products. Heatphysical basis]. St. Petersburg, GIORD Publ., 2007. 224 p.
2. *Handbook of Frozen Food Processing and Packaging*. In ed. D.W. Sun. CRC Press, Boca Raton. 2016, 936 p.
3. *Varzakas T., Tzia C.* Handbook of Food Processing Food Preservation. CRC Press. 2016. 705p.
4. *Chizhov G.B.* *Teplofizicheskie protsessy v kholodil'noy tekhnologii pishchevykh produktov* [Thermophysical processes in refrigeration technology of food products]. Moscow, Food Industry Publ., 1979, 271 p.
5. *Berk Z.* *Food process engineering and technology*. Academic Press. 2018. 690 p.
6. *Syamaladevi R., Tang Ju., Villa-Rojas R., Sablani Sh., Carter B., Campbell G.* Influence of Water Activity on Thermal Resistance of Microorganisms in Low-Moisture Foods: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2016, no. 15(2), pp. 353–370.
7. *Rogov I.A., Babakin B.S., Fatykhov Yu.A.* *Krioseparatsiya syr'ya biologicheskogo proiskhozhdeniya* [Crio-separation of raw material biological origin]. Rjazan, Nashe vremja Publ., 2005, 288 p.
8. *Erlikhman V.N., Fatykhov Yu.A.* Uchet aktivnosti vody v raschetakh skorosti usushki pishchevogo produkta [The account of water activity in the calculation of the rate of food product shrinkage]. *Voronezh St. University of Eng. Tech. news*. 2018, V. 80, no. 3, pp. 18–21.
9. *Erlikhman V.N., Fatykhov Yu.A.* Metodika rascheta skorosti usushki pishchevogo produkta v zavisimosti ot aktivnosti vody v protsessakh kholodil'noi tekhnologii [Calculation method of food product drying speed depending on water activity in the processes of refrigeration technology]. *International Academy of Refrigeration*. 2018, no. 4, pp. 10–14.
10. *Evans Dzh.A.* *Zamorozhennyye pishchevyye produkty: proizvodstvo i realizatsiya* [Frozen food products: production and marketing]. St. Petersburg, Professiya Publ., 2010, 440 p.
11. *Frolov S.V., Kutzakova V.E., Kipnis V.L.* Тепло- и массообмен в расчетах процессов холодильной технологии пищевых продуктов [Thermal and mass exchange at calculating processes of refrigeration technology of food products]. Moscow, Kolos-Press Publ., 2001, 144 p.
12. *Xiao Z., Lai Yu., Zang M.* Study on the freezing temperature of saline soil. *Acta Geotechnica*. 2018, V. 13, Is. 1, pp. 195–205.
13. *Kirby R., Bartram J., Carr R.* Water in food production and processing: Quantity and quality concerns. *Food Control*. 2003, no. 14(5), pp. 283–299.
14. *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.
15. *Baron C.P., Kjaersgard I.V.H., Jessen F., Jacobsen C.* Protein and lipid oxidation during frozen storage of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2007, no. 55(20), pp. 8118–8125.

Статья поступила в редакцию 13.11.2018