

Исследование влияния низкотемпературного воздействия на активность воды пищевых продуктов

В.А. Ермолаев

Кузбасская государственная
сельскохозяйственная академия,
г. Кемерово, Россия

Корреспонденция:

Ермолаев Владимир
Александрович,
Кузбасская государственная
сельскохозяйственная академия,
650056, г. Кемерово,
ул. Марковцева, д. 5, Российская
Федерация
E-mail: ermolaevla@rambler.ru

Конфликт интересов:

авторы сообщают
об отсутствии конфликта
интересов.

Поступила: 05.01.2023

Принята: 05.03.2023

Опубликована: 31.03.2023

Copyright: © 2023 Автор

АННОТАЦИЯ

Введение: Активность воды является интегральной характеристикой состояния влаги в продукте, по которой можно оценивать правильность протекания тех или иных технологических процессов, а также прогнозировать сроки хранения продукта. Существующие исследования активности воды в пищевых продуктах проводились по большей части для положительного температурного диапазона. Исследованиям влияния низкотемпературного воздействия на активность воды уделялось мало внимания.

Цель: Статья посвящена исследованию активности воды в пищевых продуктах при различной температуре. Подобный подход позволит прогнозировать сроки хранения пищевых продуктов, а также оптимизирует разработку методов контроля функционально-технологических характеристик пищевого сырья.

Материалы и методы: В качестве объектов исследований выступали: говядина охлажденная согласно ГОСТ Р 52427-2005, свинина охлажденная, баранина охлажденная, огурцы свежие, морковь свежая, томаты свежие, зелень петрушки свежей, зелень укропа, зелень лука зеленого. Для анализа активности воды в объектах исследования использовались две установки: спроектированная в Кузбасской государственной сельскохозяйственной академии и анализатор активности воды LabSwift-aw. Опыты проводили для свежих, охлажденных и замороженных продуктов при различной температуре.

Результаты: Представлена конструкция установки, которая может использоваться для измерения активности воды. Опытным путем доказана точность измерения данной установки. Активность воды свежих продуктов находилась в пределах 0,954–0,995. Обнаружено, что при одном и том же содержании влаги активность воды может несколько различаться, что обусловлено различием в химическом составе продукта и содержании солей. На основании опытных данных выведены математические зависимости активности воды от температуры замораживания для всех исследуемых продуктов.

Выводы: Полученные результаты могут быть полезны при прогнозировании сроков хранения пищевых продуктов и разработки методов контроля функционально-технологических характеристик пищевого сырья.

Ключевые слова: замораживание, активность воды, пищевые продукты, установка



Для цитирования: Ермолаев, В. А. (2023). Исследование влияния низкотемпературного воздействия на активность воды пищевых продуктов. *FOOD METAENGINEERING*, 1(1), 9-17. <https://doi.org/10.37442/fme.2023.1.10>

Investigation of the Low-Temperature Exposure Effect on the Water Activity of Food Products

V.A. Ermolaev

Kuzbass State Agricultural
Academy, Kemerovo, Russia

ABSTRACT

Introduction: The activity of water is an integral characteristic of the moisture condition in a product, by which one can assess the correctness of various technological processes, as well as predict the shelf life of the product. Existing studies on the activity of water in food products were conducted mostly for the positive temperature range. Little attention was paid to the study of the effects of low-temperature exposure on water activity.

Purpose: The article is devoted to the study of water activity in food products at various temperatures. Such an approach will allow predicting the shelf life of food products and optimizing the development of methods for controlling the functional and technological characteristics of food raw materials.

Materials and Methods: The objects of research were: beef chilled according to GOST R 52427-2005, chilled pork, chilled mutton, fresh cucumbers, fresh carrots, fresh tomatoes, fresh parsley greens, dill greens, green onion greens. Two installations were used to analyze the water activity in the research objects: designed at the Kuzbass State Agricultural Academy, and the LabSwift-aw water activity analyzer. Experiments were conducted for fresh, chilled, and frozen products at various temperatures.

Results: A design of a homemade installation that can be used to measure water activity is presented. The accuracy of this installation's measurements is experimentally proven. An analysis of water activity in fresh, chilled, and frozen products has been conducted. The water activity of fresh products was within the range of 0.954–0.995. It was found that with the same moisture content, the water activity can vary slightly, which is due to the difference in the chemical composition of the product and the salt content. Based on experimental data, mathematical dependencies of water activity on the freezing temperature for all studied products were derived.

Conclusion: Water activity has important theoretical and practical significance, and the results of the research can be useful in predicting the shelf life of food products and developing methods to control the functional and technological characteristics of food raw materials.

Keywords: freezing, water activity, food, installation

Correspondence:

Ermolaev V. A.

Kuzbass State Agricultural Academy
5 Markovtsev ul., Kemerovo,
650056, Russian Federation
E-mail: ermolaevla@rambler.ru

Conflict of interest:

The author report the absence of a conflict of interest.

Received: 05.01.2023

Accepted: 05.03.2023

Published: 31.03.2023

Copyright: © 2023 The Author



To cite: Ermolaev, V. A. (2023). Investigation of the low-temperature exposure effect on the water activity of food products. *FOOD METAENGINEERING*, 1(1), 9-17.
<https://doi.org/10.37442/fme.2023.1.10>

ВВЕДЕНИЕ

Вода является важнейшим компонентом пищевого сырья, от которого зависят сроки годности и качество продукта. Одним из показателей воды является ее активность, которая характеризует связь влаги в продукте, она численно, равна отношению давления паров воды над данным материалом к давлению паров воды над чистой водой при одной и той же температуре (Танаков, 2021; Эрлихман, 2018). Многочисленными экспериментами было установлено, что активность воды влияет на биологические, физико-химические и микробиологические процессы, протекающие в пищевых продуктах (Макарова, 2018; Марков, 2020; Mathlouthi, 2001; Chen, 2019). В некоторых странах показатель «активность воды» является одним из обязательных при определении качества и безопасности продуктов (Сафонова, 2017; Plotnikova, 2021). Например, в США он включен в инструкцию по контролю качества пищевых продуктов (Plotnikova, 2021).

Активность воды является интегральной характеристикой состояния влаги в продукте, по которой можно оценивать правильность протекания тех или иных технологических процессов, а также прогнозировать сроки хранения продукта (Степаненко, 2020; Sandulachi, 2012; Yang, 2020; Остров, 2021). Величина активности воды показывает часть влаги, которая не связана химически с растворенными в ней веществами, то есть влагу, которая может быть вовлечена в различные процессы в пищевом сырье. При снижении активности воды замедляется жизнедеятельность микроорганизмов, вызывающих порчу продукта (Таблица 1) (Ермолаев, 2010).

Многими исследованиями авторами обоснована важность определения активности воды. Понимание того, почему одни продукты более стабильны, чем другие при одном и том же значении влагосодержания, требует изучения структуры воды и ее активности. Проводятся исследования активности тех или иных микроорганизмов при различных значениях влагосодержания (Morasi, 2022; Racchi, 2020), анализ влияния технологических режимов сушки на активность воды в пищевых продуктах (Tarafdar, 2018), совершенствуются сами методы измерения активности воды (Silva, 2018).

На активность воды влияет множество факторов: структура продукта и его химический состав, содержание влаги и ее фазовое состояние, а также температура и продолжительность хранения продукта. Исследования

Таблица 1

Пороговые значения активности воды для некоторых бактерий

Патоген	Пороговое значение активности воды
<i>Campylobacter jejuni</i>	0,99
<i>Shigella spp.</i>	0,96
<i>Yersinia enterocolitica</i>	0,96
<i>Clostridium perfringens</i>	0,95
<i>Escherichia coli</i>	0,94
<i>Salmonella spp.</i>	0,94
<i>Clostridium botulinum</i>	0,94
<i>Listeria monocytogenes</i>	0,92
<i>Staphylococcus aureus</i>	0,86

Примечание: (Ермолаев, 2010).

нию активности воды продуктов уделяется недостаточно внимания. Например, недостаточно изучено влияние температуры и фазового состояния влаги на активность воды пищевых продуктов. Цель настоящего исследования — анализ влияния низкотемпературного воздействия на активность воды пищевых продуктов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

- (1) говядина охлажденная согласно ГОСТ Р 52427–2005 «Промышленность мясная. Продукты пищевые»;
- (2) свинина охлажденная согласно ГОСТ Р 314706–2012 «Свинина мясная охлажденная»;
- (3) баранина охлажденная согласно ГОСТ 32605–2013 «Баранина. Туши и отрубы»;
- (4) морковь свежая согласно ГОСТ 32284–2013 «Морковь столовая свежая, реализуемая в розничной торговой сети. Технические условия»;
- (5) перец болгарский зеленый согласно ГОСТ 34325–2017 «Перец сладкий свежий. Технические условия»;
- (6) томаты свежие согласно ГОСТ 34298–2017 «Томаты свежие. Технические условия»;
- (7) зелень петрушки свежей согласно ГОСТ 34212–2017 «Петрушка свежая. Технические условия»;
- (8) зелень укропа свежего согласно ГОСТ 32856–2014 «Укроп свежий. Технические условия»;
- (9) зелень лука зеленого согласно ГОСТ 34214–2017 «Лук свежий зеленый. Технические условия».

Оборудование и процедура исследования

Для анализа активности воды в объектах исследования использовались две установки. Схема первой установки, спроектированной в Кузбасской государственной сельскохозяйственной академии, представлена на Рисунке 1.

Установка работает следующим образом. Исследуемый материал помещается в верхний лоток 5, который после закрытия крышки камеры 4 поднимают (Рисунок 1а). Далее включают вентилятор 2 и воздух начинает циркулировать по замкнутой системе, начинается работа установки в режиме осушения. При этом в камере воздух не входит в контакт с исследуемым материалом, но соприкасается с поверхностью сорбента (силикагеля), размещенного в нижней лотке 8 и таким образом осушается.

После осушения воздуха, не открывая крышку камеры, лоток с продуктом перемещают вниз (Рисунок 1б) и установка начинает работать в режиме измерения. При этом нижний лоток отсекается от циркулируемого воздуха, который в данном случае входит в контакт с исследуемым материалом. Воздух поглощает влагу с поверхности продукта. На входе и выходе воздуха из камеры установлены датчики 7 измерителя влажности 1. Увлажнение воздуха происходит до тех пор, пока разность показаний датчиков влажности на входе и выходе не будет соизмерима с величиной погрешности измерительного прибора, что свидетельствует об установлении равновесной относительной влажности воздуха. После

Рисунок 2

Анализатор активности воды LabSwift-aw



этого измерение прекращают, а активность воды a_w определяют по следующей формуле (Эрлихман, 2018):

$$a_w = P_w / P_0 = W_p / 100, \quad (1)$$

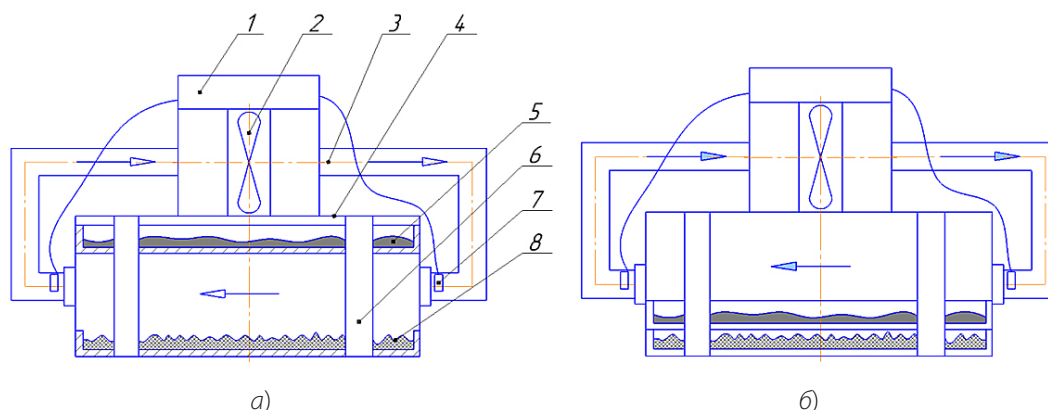
где P_w — давление водяного пара в пограничном слое над продуктом; P_0 — давление водяного пара над чистой водой; W_p — равновесная относительная влажность, %.

Фотография второй установки, которая использовалась для измерения активности воды в объектах исследования, LabSwift-aw представлена на Рисунке 2.

Охлаждение и замораживание продуктов производили в холодильных и морозильных ларях, выставленных

Рисунок 1

Схема установки для измерения показателя «активность воды» в режиме осушения (а) и измерения (б)



Примечание. 1 — измеритель влажности воздуха; 2 — вентилятор; 3 — воздухопровод; 4 — камера; 5 — лоток с исследуемым материалом; 6 — направляющие; 7 — датчики измерителя влажности; 8 — лоток с сорбентом (силикагелем)

на соответствующую температуру. Содержание влаги в продуктах определяли ускоренным методом высушивания на приборе Чижовой.

Процедура исследования

На первом этапе исследований анализировалось влагосодержание и активность воды в пищевых продуктах с использованием различных приборов. Далее проводили эксперименты по определению активности воды продуктов, охлажденных до температуры 6°C, а также замороженных до температур: -5°C, -10°C, -20°C, -30°C и -40°C. После этого были разработаны уравнения, описывающие зависимость активности воды от температуры замораживания.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Вначале был проведен анализ содержания влаги в объектах исследования и определено значение активности воды с использованием различных приборов — сконструированным (Рисунок 1) и с помощью прибора LabSwift-aw (Рисунок 2). Результаты приведены в Таблице 2.

Таблица 2

Измерение содержания влаги и активности воды в свежих пищевых продуктах

Вид продукта	Содержание влаги, %	Активность воды, измеренная сконструированным прибором	Активность воды, измеренная прибором LabSwift-aw
Мясо			
Сырое мясо говядины	71,9	0,962	0,957
Сырое мясо свинины	74,5	0,971	0,976
Сырое мясо баранины	74,1	0,968	0,962
Овощи			
Огурцы свежие	94,8	0,994	0,993
Томаты свежие	94,2	0,995	0,994
Морковь свежая	88,2	0,989	0,995
Зелень			
Зелень петрушки	87,7	0,987	0,993
Зелень укропа	85,5	0,985	0,985
Зелень лука	92,0	0,992	0,990

Активность воды свежих продуктов находилась в пределах 0,962–0,995. Наибольшей активностью воды обладали продукты с наибольшим содержанием влаги — в данном случае овощи. Обнаружено, что при одном и том же содержании влаги активность воды может несколько различаться, что обусловлено различием в химическом составе продукта и содержании солей, которые связывают влагу. Представленные данные свидетельствуют о достаточно высокой точности сконструированного прибора — разность показаний между приборами не превышала 1 %. В дальнейших экспериментах использовался сконструированный прибор, представленный на Рисунке 1.

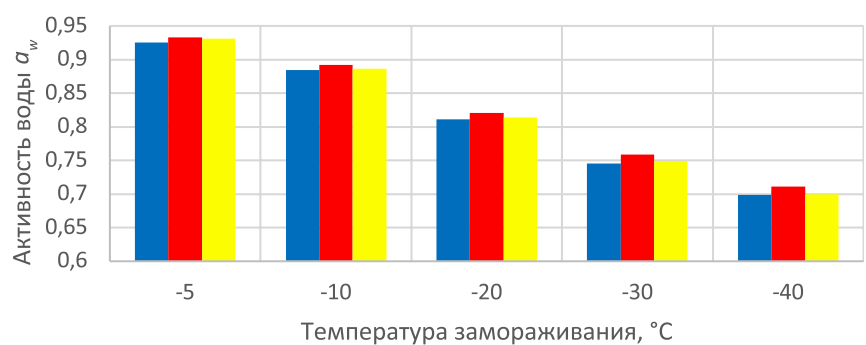
Далее проводили эксперименты по определению активности воды продуктов, охлажденных до температуры 6°C, а также замороженных до температур: -5°C, -10°C, -20°C, -30°C и -40°C. Результаты сведены в Таблице 3.

Установлено, что охлаждение продуктов с 22 до 6°C приводит к снижению активности воды в среднем на 2 %. Замораживание до температуры -5°C влечет за собой дальнейшее уменьшение активности воды в среднем на 0,03 ед. Снижение активности воды при замораживании обусловлено тем, что связанная вода в продуктах переходит в тканевые соки вследствие денатурации белков. Понижение температуры замораживания заметно влияет на активность воды, что обусловлено увеличением доли вымороженной влаги и снижением парциального давления над поверхностью продукта (Эрлихман, 2018). Понижение температуры замораживания с -5°C до -10°C, -20°C, -30°C и -40°C обуславливает уменьшение активности воды в среднем на 0,04; 0,07; 0,06 и 0,05 единиц соответственно.

Полученные результаты согласуются с проводимыми ранее исследованиями (Leugonie, 2012; Miyawaki, 2018), где также было доказано, что низкотемпературное воздействие снижает активность воды. Наблюдается нелинейная зависимость между температурой замораживания и активностью воды продуктов. Для разработки уравнений, описывающих зависимость активности воды от температуры замораживания было использовано программное обеспечение Microsoft Excel, позволяющее выводить уравнения регрессии по графикам. На Рисунке 3 приведены графики зависимости активности воды от температуры замораживания продуктов и соответствующее уравнение регрессии.

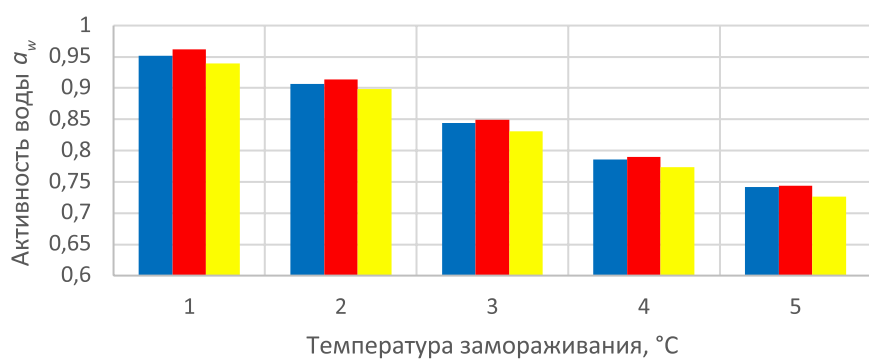
Рисунок 3

График зависимости активности воды продуктов от температуры замораживания



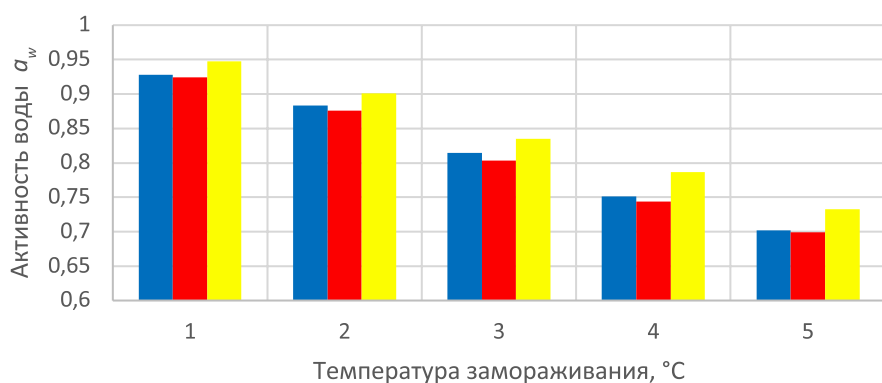
■ Сырое мясо говядины ■ Сырое мясо свинины ■ Сырое мясо баранины

Мясо



■ Огурцы свежие ■ Томаты свежие ■ Морковь свежая

Овощи



■ Зелень петрушки ■ Зелень укропа ■ Зелень лука

Зелень

Таблица 3

Измерение активности воды охлажденных и замороженных пищевых продуктов

Продукт	Активность воды					
	Охлажденные до $t = 6^{\circ}\text{C}$	Замороженные				
		$t = -5^{\circ}\text{C}$	$t = -10^{\circ}\text{C}$	$t = -20^{\circ}\text{C}$	$t = -30^{\circ}\text{C}$	$t = -40^{\circ}\text{C}$
Мясо						
Сырое мясо говядины	0,954	0,925	0,884	0,811	0,745	0,699
Сырое мясо свинины	0,962	0,933	0,892	0,821	0,759	0,711
Сырое мясо баранины	0,960	0,931	0,886	0,814	0,749	0,700
Овощи						
Огурцы свежие	0,976	0,952	0,907	0,844	0,786	0,742
Томаты свежие	0,985	0,962	0,914	0,849	0,790	0,744
Морковь свежая	0,961	0,939	0,898	0,831	0,773	0,726
Зелень						
Зелень петрушки	0,950	0,928	0,883	0,814	0,751	0,702
Зелень укропа	0,945	0,924	0,876	0,803	0,744	0,699
Зелень лука	0,970	0,947	0,901	0,835	0,787	0,733

Полученные уравнения регрессии для всех продуктов можно представить в общем виде:

$$a_w = a \cdot 10^{-5}t^2 + bt + c, \quad (2)$$

где a_w — активность воды; t — температура замораживания, $^{\circ}\text{C}$; a , b , c — эмпирические коэффициенты (Таблица 4).

Таблица 4

Эмпирические коэффициенты уравнения регрессии (2) для пищевых продуктов

Продукт	Эмпирические коэффициенты к формуле (2)		
	a	b	c
Мясо			
Сырое мясо говядины	6	0,0093	0,971
Сырое мясо свинины	6	0,009	0,976
Сырое мясо баранины	6	0,0094	0,975
Овощи			
Огурцы свежие	6	0,0087	0,992
Томаты свежие	7	0,0091	1,003
Морковь свежая	6	0,0086	0,98
Зелень			
Зелень петрушки	6	0,0091	0,971
Зелень укропа	8	0,01	0,97
Зелень лука	6	0,0084	0,984

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволили полностью достигнуть поставленной цели по анализу влияния низкотемпературного воздействия на активность воды. В ходе работы была исследована активность воды в пищевых продуктах, находящихся в свежем, охлажденном и замороженном состоянии. Полученные результаты были ожидаемыми: замораживание и последующее понижение температуры замороженного продукта ведет к снижению активности воды. Выведены эмпирические зависимости активности воды от температуры замораживания. Ограничениями полученных результатов являются температурный диапазон, в котором проводилось исследование: $+6 \dots -40^{\circ}\text{C}$, а также виды пищевых продуктов, которые использовались в исследованиях.

Установлено, что разработанный прибор для измерения активности воды показывает достаточно высокую точность измерения и может использоваться в научных исследованиях. Активность воды имеет важное теоретическое и прикладное значение, а полученные результаты исследований могут быть полезны при прогнозировании сроков хранения пищевых продуктов и разработки методов контроля функционально-технологических характеристик пищевого сырья. Представленные результаты могут быть полезны работниками пищевой промышленности, технологам и научным сотрудникам, занимающимся исследованиями пищевых систем.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Ермолаев, В. А., Шушпанников, А. Б. (2010). Исследование показателя активности воды сухих молочных продуктов. *Техника и технология пищевых производств*, 2(17), 84–88.
- Yermolaev, V. A., & Shushpannikov, A. B. (2010). Study of the water activity index of dry dairy products. *Technique and Technology of Food Production*, 2(17), 84–88. (In Russ.)
- Макарова Г. В. (2018). Роль барьера «активность воды» в управлении безопасностью пищевых продуктов. *Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства*, 20, 224–227.
- Makarova, G. V. (2018). The role of the 'water activity' barrier in managing the safety of food products. *Current Issues in Improving the Technology of Production and Processing of Agricultural Products*, 20, 224–227. (In Russ.)
- Марков Ю. Ф. (2020). Показатель активности воды и его применение при оптимизации процесса холодного копчения рыбы. *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК — продукты здорового питания*, 4, 160–164.
- Markov, Y. F. (2020). The water activity index and its application in optimizing the process of cold smoking fish. *Technologies of Food and Processing Industry of the Agro-Industrial Complex — Healthy Eating Products*, 4, 160–164. (In Russ.)
- Остров, Н. (2021). Прогнозирование сроков годности мясо-продуктов. Активность воды. *Мясной ряд*, 2(84), 48–49.
- Ostrov, N. (2021). Predicting the shelf life of meat products. Water activity. *Meat Row*, 2(84), 48–49. (In Russ.)
- Сафонова, Ю. А., Жаркова, И. М., Баринов, А. С. (2017). Влияние активности воды на свойства сырья при хранении. *Хлебопродукты*, 12, 52–55.
- Safonova, Y. A., Zharkova, I. M., Barinov, A. S. (2017). The influence of water activity on the properties of raw materials during storage. *Bread Products*, 12, 52–55. (In Russ.)
- Степаненко, Е. И., Нехамкин, Б. Л. (2017). Активность воды на страже качества рыбной продукции. *Контроль качества продукции*, 10, 50–53.
- Stepanenko, E. I., & Nekhamkin, B. L. (2017). Water activity guarding the quality of fish products. *Quality Control of Products*, 10, 50–53. (In Russ.)
- Степаненко, Е. И., Нехамкин, Б. Л. (2020). Влияние активности воды на стабилизацию качества соленой атлантической сельди в процессе хранения. *Труды АтлантНИРО*, 41(9), 187–194.
- Stepanenko, E. I., & Nekhamkin, B. L. (2020). The effect of water activity on the quality stabilization of salted Atlantic herring during storage. *Proceedings of AtlantNIRO*, 41(9), 187–194. (In Russ.)
- Танаков, Н. Т., Улугбекова, А. У. (2021). Изучение активности воды яблок сортов Кыргызской и Зарубежной селекции при хранении в условиях Ошской области. Наука. Образование. *Техника*, 1(70), 59–66.
- Tanakov, N. T., & Ulugbekova, A. U. (2021). Study of water activity of apple varieties from Kyrgyz and foreign breeding stored in the conditions of Osh region. *Science. Education. Technique*, 1(70), 59–66. (In Russ.)
- Эрлихман, В. Н., Фатыхов, Ю. А. (2018). Влияние связанной воды на ее активность при замораживании продуктов. *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств*, 4, 36–41.
- Erlikhman, V. N., & Fatykhov, Y. A. (2018). The influence of bound water on its activity during the freezing of products. *Scientific Journal of ITMO University. Series: Processes and Equipment of Food Production*, 4, 36–41. (In Russ.)
- Эрлихман, В. Н., Фатыхов, Ю. А. (2018). Методика расчета скорости усушки пищевого продукта в зависимости от активности воды в процессах холодильной технологии. *Вестник Международной академии холода*, 4, 10–14.
- Erlikhman, V. N., & Fatykhov, Y. A. (2018). Methodology for calculating the drying rate of a food product depending on water activity in refrigeration technology processes. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*, 4, 10–14. (In Russ.)
- Angamuthu, M., Shankar, V. K., & Murthy, S. N. (2018). Water activity and its significance in topical dosage forms. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 107(6), 1656–1666. <https://doi.org/10.1016/j.xphs.2018.02.013>
- Chen, C. (2019). Relationship between water activity and moisture content in floral honey. *Foods*, 8(30). <https://doi.org/10.3390/foods8010030>
- Leygonie, C., Britz, T. J., & Hoffman, L. C. (2012). Impact of freezing and thawing on the quality of meat: Review. *Meat Science*, 91, 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.01.013>
- Mathlouthi, M. (2001). Water content, water activity, water structure and the stability of foodstuffs. *Food Control*, 12(7), 409–417. [https://doi.org/10.1016/S0956-7135\(01\)00032-9](https://doi.org/10.1016/S0956-7135(01)00032-9)

- Miyawaki, O. (2018). Water and freezing in food. *Food Science and Technology Research*, 24, 1–21. <https://doi.org/10.3136/fstr.24.1>
- Morasi, R. M., Alonso, V. P. P., Silva, N. C. C., Rall, V. L. M., & Dantas, S. T. A. (2022). Salmonella spp. in low water activity food: Occurrence, survival mechanisms, and thermoresistance. *Journal of Food Science*, 87(6), 2310–2323. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16152>
- Plotnikova, I. V., Zharkova, I. M., Magomedov, G. O., Magomedov, M. G., Khvostov, A. A., & Miroshnichenko, E. N. (2021). Forecasting and quality control of confectionery products with the use of "water activity" indicator. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. "International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials — Quality Management and Manufacturing Execution in Agricultural Processing"* (vol. 640, 062003). IOP Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/640/6/062003>
- Racchi I., Scaramuzza N., Hidalgo A., & Berni E. (2020). Combined effect of water activity and ph on the growth of food-related ascospore-forming molds. *Annals of Microbiology*, 70(1), 1–9. <https://doi.org/10.1186/s13213-020-01612-6>
- Sandulachi, E. (2012). Water activity concept and its role in food preservation. *Meridian Engineering*, 4, 40–48.
- Silva, S. H., Lago, A. M. T., Rivera, F. P., Prado, M. E. T., Braga, R. A., & De resende, Ja. V. (2018). Measurement of water activities of foods at different temperatures using biospeckle laser. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12(3), 2230–2239. <https://doi.org/10.1007/s11694-018-9839-8>
- Tarafdar, A., Shahi, N. Ch., Singh, A., & Sirohi, R. (2018). Artificial neural network modeling of water activity: A low energy approach to freeze drying. *Food and Bioprocess Technology*, 11(1), 164–171. [https://doi.org/10.1016/S0167-7012\(00\)00201-3](https://doi.org/10.1016/S0167-7012(00)00201-3)
- Yang, R., Guan, J., Sun, S., Sablani, S. S., & Tang, J. (2020). Understanding water activity change in oil with temperature. *Current Research in Food Science*, 14(3), 158–165. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2020.04.001>