

Научная статья

УДК 663.48

DOI: 10.36718/1819-4036-2022-2-199-208

Татьяна Германовна Короткова<sup>1✉</sup>, Александра Сергеевна Данильченко<sup>2</sup>,  
Наталья Юрьевна Истошина<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

<sup>1</sup> korotkova1964@mail.ru

<sup>2</sup> danilchenkoas@inbox.ru

<sup>3</sup> mnu32@mail.ru

## ИЗМЕНЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ЖИДКИХ РАСТВОРОВ ПРИ СУШКЕ

Кинетику сушки влажных материалов принято изображать в виде графических зависимостей кривой сушки в координатах «влажность – время сушки» и кривой скорости сушки в координатах «скорость сушки – влажность». При небольшой концентрации (4–10 %) сухих веществ в растворе влажность в начальный момент времени является очень большим и может составлять более 10 000 %, а в конце процесса сушки становится равным равновесному влажностному, которое на кривой сушки практически сливается с осью абсцисс. Цель исследования – выявление закономерностей графической зависимости «влажность раствора – время сушки» для жидких растворов и высоковлажных материалов. Предложено дополнить исследование кинетики сушки жидких растворов с концентрацией сухих веществ менее 10 % графической зависимостью «влажность раствора – время сушки». В качестве объектов исследования рассмотрены смеси: фильтрат пивной дробины, пивная дробина, вода – масло, вода – сахар, вода – белок (белок смешан с дистиллированной водой, нагретой до 100 °С). Температура сушильного агента 60 °С. Приведены экспериментальные данные по кинетике сушки жидкого раствора дистиллированная вода – денатурированный белок, полученного путем выдерживания гомогенного раствора дистиллированная вода – нативный белок на водяной бане при 110 °С с последующей сушкой при температуре 60 °С. Рассмотрена морфология структурообразования высушенных растворов с нативным белком и денатурированным. Нативный белок, растворенный в дистиллированной воде, после сушки представляет собой сплошную тонкую мутную пленку, а пленка денатурированного белка является прозрачной, изрезанной, неравномерной по толщине и с четко выраженными неровностями. Установлено, что характер зависимости «влажность раствора – время сушки» при малом значении концентрации сухих веществ является крутым, при увеличении концентрации – становится пологим, характерным для большинства влажных материалов. Удаление свободной влаги соответствует двум участкам на данной кривой.

**Ключевые слова:** жидкий раствор, кинетика сушки, влажность раствора

**Для цитирования:** Короткова Т.Г., Данильченко А.С., Истошина Н.Ю. Изменение влажности жидких растворов при сушке // Вестник КрасГАУ. 2022. № 2. С. 199–208. DOI: 10.36718/1819-4036-2022-2-199-208.

Tatyana Germanovna Korotkova<sup>1✉</sup>, Alexandra Sergeevna Danilchenko<sup>2</sup>,  
Natalia Yurievna Istoshina<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

<sup>1</sup> korotkova1964@mail.ru

<sup>2</sup> danilchenkoas@inbox.ru

<sup>3</sup> mnu32@mail.ru

## CHANGES IN THE LIQUID SOLUTIONS HUMIDITY DURING DRYING

The drying kinetics of wet materials is usually depicted as graphic dependences of the drying curve in the coordinates "moisture content – drying time" and the drying rate curve in the coordinates "drying speed – moisture content". At a low concentration (4–10 %) of solids in the solution, the moisture content at the initial moment of time is very large and can be more than 10,000 %, and at the end of the drying process it becomes equal to the equilibrium moisture content, which practically merges with the abscissa axis on the drying curve. The purpose of the study is to identify the regularities of the graphic dependence "solution moisture – drying time" for liquid solutions and high-moisture materials. It is proposed to supplement the study of the kinetics of drying liquid solutions with a solids concentration of less than 10 % with a graphical dependence "solution moisture – drying time". The following mixtures were considered as objects of study: brewer's grain filtrate, brewer's grain, water – oil, water – sugar, water – protein (protein is mixed with distilled water heated to 100 °C). The temperature of the drying agent is 60 °C. Experimental data are presented on the kinetics of drying a liquid solution of distilled water – denatured protein obtained by keeping a homogeneous solution of distilled water – native protein in a water bath at 110 °C followed by drying at a temperature of 60 °C. The morphology of structure formation of dried solutions with native and denatured proteins is considered. The native protein dissolved in distilled water, after drying, is a continuous thin cloudy film, and the denatured protein film is transparent, indented, uneven in thickness and with clearly defined irregularities. It has been established that the nature of the dependence "solution moisture – drying time" at a low concentration of solids is steep, with an increase in concentration it becomes flat, characteristic of most wet materials. The removal of free moisture corresponds to two sections on this curve.

**Keywords:** liquid solution, drying kinetics, solution humidity

**For citation:** Korotkova T.G., Danilchenko A.S., Istoshina N.Yu. Changes in the liquid solutions humidity during drying // Bulliten KrasSAU. 2022;(2):199–208. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2022-2-199-208.

**Введение.** Кинетику сушки влажных материалов принято изображать в виде графических зависимостей кривой сушки в координатах «влажность – время сушки» и кривой скорости сушки в координатах «скорость сушки – влажность» [1, 2]. Графическая зависимость кривой сушки для всех жидких растворов является типовой, плавно убывающей до равновесного влагосодержания, включающей прямолинейный участок (1-й период сушки) и криволинейный (2-й период сушки). Наклон прямолинейного участка является пологим, зависящим от скорости сушки. В практике сушки высоковлажных материалов и жидких растворов с концентрацией сухих веществ менее 10 % влагосодержание в начальный момент времени является очень большим и может составлять более 10 000 %. В связи с этим исследователи представляют экспериментальные данные в координатах «масса материала – время сушки» [3, 4] или «влажность материала – время сушки» [5, 6].

Из жидких растворов методом сушки получают сухое молоко, растительные экстракты,

сухие растительные белки, овощные порошки, фармацевтические порошки и др. В основном используют распылительную сушилку для сушки жидких растворов в нативном виде или предварительно упаренных в вакуум-выпарных установках [7, 8]. Выбор сушильной установки и определение оптимальных режимов сушки базируются на опытных данных по кинетике сушки влажных материалов [5, 7]. Важное значение имеют структура высушиваемого материала, его термолабильные свойства и морфология структурообразования в процессе сушки.

Зависимость «влажность раствора – время сушки» является менее изученной, так как не получила широкого представления при описании экспериментальных данных по кинетике сушки. Изучению этой графической зависимости посвящена данная работа.

**Цель исследования** – выявление закономерностей графической зависимости «влажность раствора – время сушки» для жидких растворов и высоковлажных материалов.

**Задачи:** получение дополнительных данных по кинетике сушки жидких растворов и высоковлажных материалов путем анализа графической зависимости «влажность раствора (материала) – время сушки».

**Объект, предмет и методы.** Объектом исследования являются смеси: фильтрат пивной дробины, пивная дробина, вода – масло, вода – сахар, вода – денатурированный белок. Предмет исследования – графическая зависимость «влажность раствора (материала) – время сушки» при сушке высоковлажных материалов и жидких растворов с инертной поверхности при вынужденной конвекции. Методы исследования: графоаналитический – для анализа зависимостей «влажность раствора (материала) – время сушки» и экспериментальный – для исследования морфологии структурообразования в конце сушки и кинетики сушки жидкого раствора дис-

тиллированная вода – денатурированный белок, полученного путем выдерживания гомогенного раствора дистиллированная вода – нативный белок на водяной бане при 110 °С с последующей сушкой при 60 °С.

**Результаты и их обсуждение.** В таблице 1 приведена характеристика объектов исследования и литературные источники, в которых представлены экспериментальные данные по кинетике конвективной сушки при температуре сушильного агента 60 °С и скорости 4,5 м/с. На рисунках 1, 3–6 приведены графические зависимости «влажность раствора (материала) – время сушки» следующих смесей: фильтрат пивной дробины (рис. 1), высоковлажный материал пивной дробины (рис. 3), смесей: вода – масло (рис. 4), вода – сахар (рис. 5), вода – белок (рис. 6).

Таблица 1

**Характеристика объектов исследования**

Объект исследования	Характеристика объекта исследования	Источник
Фильтрат пивной дробины	Насыщенный коричневый цвет. Содержание сухих веществ 6,26 %	[9]
Пивная дробина	Высоковлажная твердая фракция (рис. 2) с размером частиц от 6 до 9 мм. Содержание сухих веществ 12,9 % (2018 г.). Содержание сухих веществ 19,2 % (2019 г.)	[10] [11]
Вода – масло	Масло подсолнечное нерафинированное высшего сорта холодного прессования фасованное краснодарское элитное высокоолеиновое. Содержание сухих веществ ~0 %. Влажность масла составляет 0,05 %	[12]
Вода – сахар	Сахар-песок из торговой сети с размерами кристаллов 0,2–2,5 мм. Влажность сахара 0,15 %	[12]
Вода – белок	В воду, доведенную до кипения, добавлен нативный куриный яичный белок, отобранный из сырых яиц АО «Агрокомплекс» им. Н.И.Ткачева. Белок из обычной полупрозрачной массы приобрел нитевидную структуру белого цвета. Содержание влаги в нативном курином яичном белке сырых яиц АО «Агрокомплекс» им. Н.И.Ткачева – 88,42 %	[13] [12]

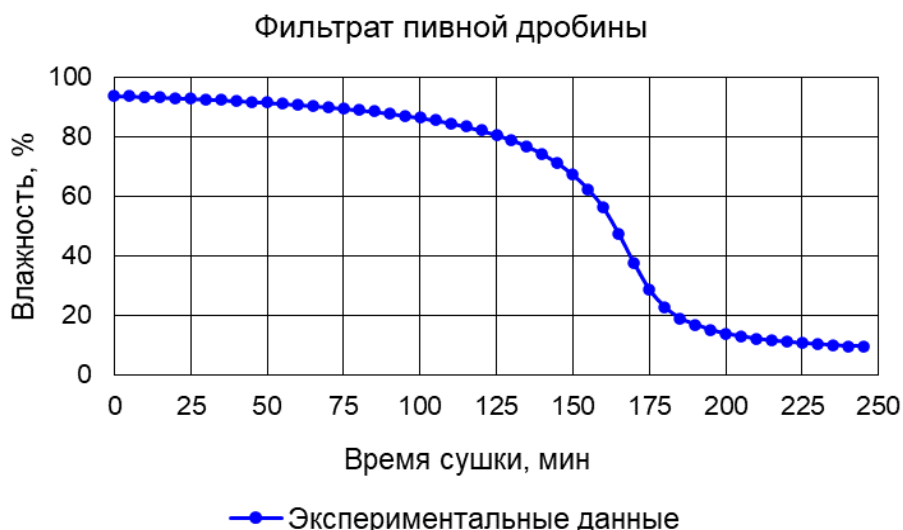


Рис. 1. Зависимость влажности фильтрата пивной дробины от времени сушки при температуре сушильного агента 60 °С

Анализ зависимостей показал, что для высоковлажных материалов пивная дробина 2019 г. (рис. 3) и вода – сахар (рис. 5) кривая «влажность – время сушки» состоит из трех периодов: прогрев материала, 1-й период сушки (постоянная скорость) и 2-й период сушки (падающая скорость) и является полой в 1-м периоде сушке. Для жидких растворов период прогрева отсутствует, а 1-й период характеризуется двумя типами кривых, характеризующихся незначительным изменением влажности за очень длительный промежуток времени и резким – за малый промежуток времени. Последнее ярко вы-

ражено крутым участком на кривых рисунков 1, 3 (пивная дробина 2018 г.), рисунков 4, 6. Такое поведение кривой «влажность – время сушки» можно объяснить переходным процессом при изменении свойств материала от состояния жидкого раствора к насыщенному. Таким образом, удаление свободной влаги соответствует двум участкам на данной кривой. Процесс сушки во 2-м периоде протекает аналогично сушке материалов с низкой влажностью, когда скорость сушки обусловлена скоростью внутренней диффузии влаги из глубины высушиваемого материала к его поверхности.



Рис. 2. Сырая пивная дробина

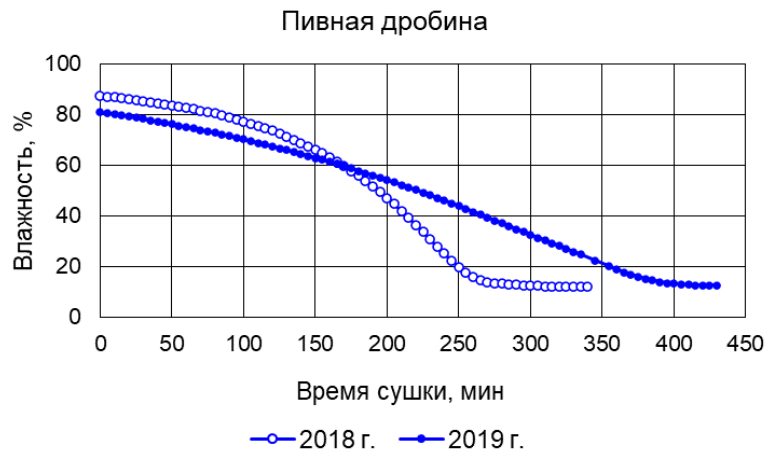


Рис. 3. Зависимость влажности пивной дробины от времени сушки при температуре сушильного агента 60 °С

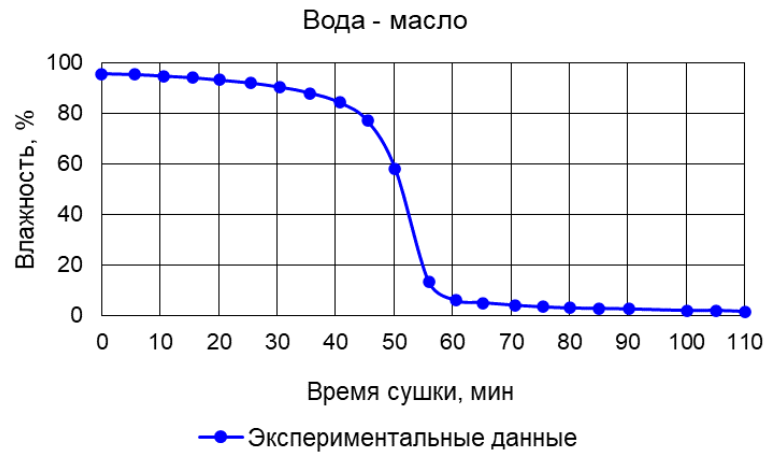


Рис. 4. Зависимость влажности смеси вода – масло от времени сушки при температуре сушильного агента 60 °С

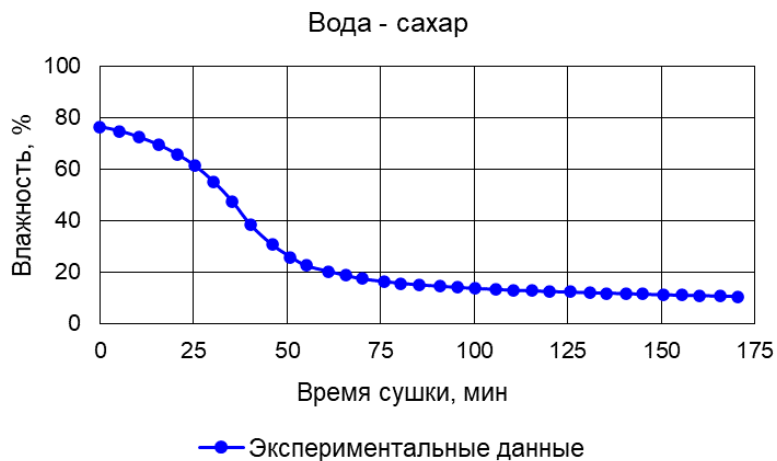


Рис. 5. Зависимость влажности смеси вода – сахар от времени сушки при температуре сушильного агента 60 °С

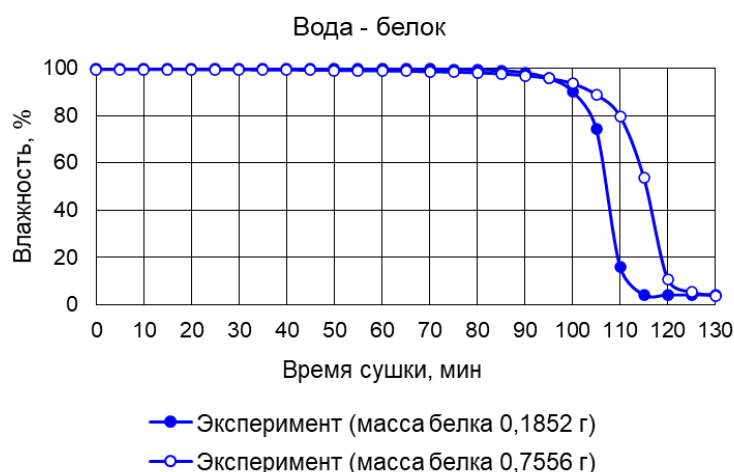


Рис. 6. Зависимость влажности смеси вода – белок от времени сушки при температуре сушильного агента 60 °С

Рассмотрим кинетику сушки жидкого раствора дистиллированная вода – денатурированный белок, полученного путем выдерживания гомогенного раствора дистиллированная вода – нативный белок на водяной бане при 110 °С с последующей конвективной сушкой при температуре сушильного агента 60 °С. Смесь дистилли-

рованная вода – нативный белок после нагревания на водяной бане помутнела, появились белые хлопья (произошла денатурация белка). Экспериментальные данные по кинетике сушки для различного содержания нативного белка (0,3861 г; 0,9106; 1,2688 г) приведены в таблице 2 и на рисунке 7.

Таблица 2

**Исследование кинетики сушки смеси дистиллированная вода – денатурированный белок при температуре сушильного агента 60 °С**

Время, мин	Масса навески (дистиллированная вода + денатурированный белок), г	Влажность, %	Влагосодержание, %
1	2	3	4
Масса нативного белка 0,3861 г, содержание сухих веществ в белке 11,58 %			
0	10,4518	99,57	23276,67
5,9	7,3334	99,39	16302,01
11,3	6,2767	99,29	13938,57
18,25	4,8069	99,07	10651,19
23,617	3,8658	98,84	8546,31
27,967	2,7970	98,40	6155,82
33,133	1,9323	97,69	4221,82
38,133	1,2414	96,40	2676,54
43,5	0,7887	94,33	1664,02
47,783	0,4743	90,57	960,83
53,533	0,2115	78,86	373,04
58,5	0,1107	59,61	147,59
63,45	0,0759	41,09	69,76
68,633	0,0727	38,50	62,60
73,72	0,0727	38,50	62,60
Масса нативного белка 0,9106 г, содержание сухих веществ в белке 11,58 %			
0	9,7703	98,92	9165,56
5,733	8,3294	98,73	7799,10

1	2	3	4
10,333	7,2614	98,55	6786,27
15,433	6,0229	98,25	5611,75
20,933	4,9194	97,86	4565,26
25,633	4,0049	97,37	3698,00
30,567	2,9572	96,43	2704,43
35,400	2,0223	94,79	1817,83
40,967	1,2507	91,57	1086,09
45,867	0,7423	85,79	603,95
50,833	0,4331	75,65	310,73
55,567	0,2833	62,78	168,66
60,800	0,2111	50,05	100,19
65,100	0,1871	43,64	77,43
70,767	0,1765	40,26	67,38
75,400	0,1738	39,33	64,82
Масса нативного белка 1,2688 г, содержание сухих веществ в белке 11,58 %			
0	10,1558	98,55	6812,14
5,300	8,6752	98,31	5804,43
10,000	7,5329	98,05	5026,97
15,667	6,3323	97,68	4209,83
20,667	5,2840	97,22	3496,34
25,333	4,1938	96,50	2754,34
30,233	3,2821	95,52	2133,83
35,867	2,3972	93,87	1531,56
40,467	1,6630	91,16	1031,85
45,367	1,0555	86,08	618,38
50,400	0,5823	74,77	296,32
55,033	0,3212	54,26	118,61
60,233	0,2557	42,54	74,03
65,300	0,2461	40,30	67,50
70,967	0,2411	39,06	64,10

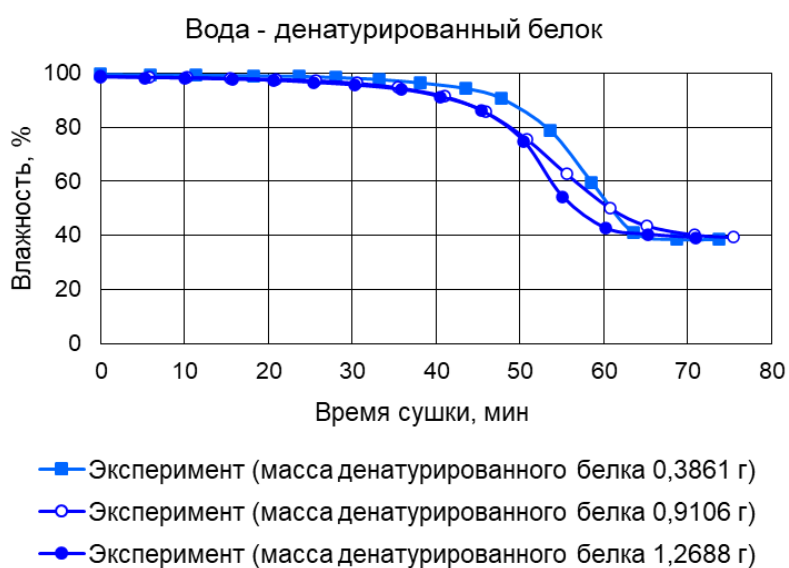


Рис. 7. Зависимость влажности смеси вода – денатурированный белок от времени сушки при температуре сушительного агента 60 °C

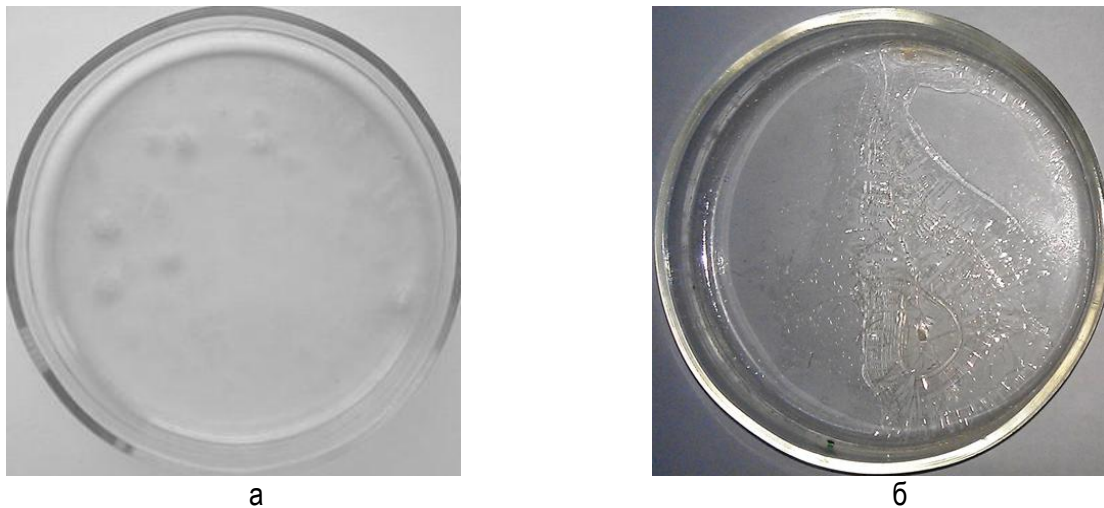


Рис. 8. Морфология структурообразования белка после сушки при температуре сушильного агента 60 °С:  
 а – пленка нативного белка после испарения дистиллированной воды;  
 б – пленка денатурированного белка после испарения дистиллированной воды

Характер зависимости «влажность – время сушки» (рис. 7) соответствует приведенным выше жидким растворам. Однако влажность в конце сушки является высокой – порядка ~39 %. Это можно объяснить денатурацией, которая привела к агрегации частиц белка в более крупные, с образованием хлопьев, что в свою очередь послужило причиной изменения свойств и перераспределения содержания свободной и связанной влаги в материале.

Морфология структурообразования белка в конце сушки приведена на рисунке 8. Нативный белок, размещенный в дистиллированной воде, после сушки представляет собой сплошную тонкую мутную пленку, приклеенную ко дну чашки Петри, представляющей собой инертную поверхность. Пленка денатурированного белка является прозрачной, изрезанной, неравномерной по толщине и по поверхности чашки Петри и с четко выраженными неровностями.

**Заключение.** Выполнен анализ зависимости «влажность раствора – время сушки» для высоковлажных материалов и жидких растворов. Для высоковлажных материалов кривая «влажность – время сушки» состоит из трех периодов: прогрев материала, 1-й и 2-й периоды сушки – и является пологой в 1-м периоде сушки. Для жидких растворов период прогрева отсутствует, а удаление свободной влаги в 1-м периоде соответствует двум участкам на данной кривой. Пер-

вый участок характеризуется незначительным изменением влажности за очень длительный промежуток времени и второй – резким изменением влажности за малый промежуток времени. Морфология структурообразования белка в конце сушки показала, что нативный белок, размещенный в дистиллированной воде, после сушки представляет собой сплошную тонкую мутную пленку, а пленка денатурированного белка является прозрачной, изрезанной, неравномерной по толщине и по поверхности, с четко выраженными неровностями. Предложено дополнить исследование кинетики сушки жидких растворов с концентрацией сухих веществ менее 10 % графической зависимостью «влажность раствора – время сушки».

#### Список источников

1. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
2. Tavakolipour H. Drying Kinetics of Pistachio Nuts (*Pistacia vera* L.) // World Applied Sciences Journal 12 (9): 1639–1646, 2011.
3. Both E.M., Tersteeg S.M.B., Boom R.M., Schutyser M.A.I. Drying kinetics and viscoelastic properties of concentrated thin films as a model system for spray drying // Colloids and Surfaces A 585, 2020. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2019.124075.



4. Некоторые кинетические особенности сушки жидких дисперсных продуктов на твердых подложках / А.Н. Пахомов [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 11 (65). Ч. 4. С. 63–66. DOI: 10.23670/IRJ.2017.65.052.
5. Моделирование кинетики сушки с анализом характеристик процесса / А.В. Зыков [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 11 (101). Ч. 1. С. 127–133. DOI: 10.23670/IRJ.2020.101.11.021.
6. Исследование процесса сушки растительного сырья / А.В. Зыков [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 11 (101). Ч. 1. С. 134–139 DOI: 10.23670/IRJ.2020.101.11.022.
7. Уланбек К.А., Кочнева С.В. Разработка малогабаритной распылительной сушилки для сушки термолабильных пищевых продуктов // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2020. № 3 (55). С. 385–389.
8. Долинский А.А., Малецкая К.Д. Распылительная сушка. М., 2015. 590 с.
9. Короткова Т.Г., Данильченко А.С. Применение математической модели нестационарного испарения жидких растворов для описания кинетики сушки фильтрата пивной дробины // Вестник КрасГАУ. 2021. № 7. С. 204–210. DOI: 10.36718/1819-4036-2021-7-204-210.
10. Короткова Т.Г., Данильченко А.С., Истошина Н.Ю. Исследование кинетики сушки пивной дробины // Известия вузов. Пищевая технология. 2020. № 4. С. 80–83. DOI: 10.26297/0579-3009.2020.4.19.
11. Короткова Т.Г., Данильченко А.С. Совершенствование технологии переработки пивной дробины в сухую кормовую добавку // Известия вузов. Пищевая технология. 2021. № 1. С. 59–62. DOI: 10.26297/0579-3009.2021.1.14.
12. Данильченко А.С., Короткова Т.Г., Ксандопуло С.Ю. Кинетика испарения модельного раствора послеспиртовой барды, содержащего белок, масло и сахар // Известия вузов. Пищевая технология. 2018. № 1. С. 87–90.
13. Данильченко А.С., Короткова Т.Г., Ксандопуло С.Ю. Кинетика процесса испарения дистиллированной воды при сушке смеси вода – белок в изотермических условиях // Известия вузов. Пищевая технология. 2018. № 4. С. 64–67.

## References

1. Lykov A.V. Teoriya sushki. M.: `Energiya, 1968. 472 s.
2. Tavakolipour H. Drying Kinetics of Pistachio Nuts (*Pistacia vera* L.) // World Applied Sciences Journal 12 (9): 1639-1646, 2011.
3. Both E.M., Tersteeg S.M.B., Boom R.M., Schutyser M.A.I. Drying kinetics and viscoelastic properties of concentrated thin films as a model system for spray drying // Colloids and Surfaces A 585, 2020. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2019.124075.
4. Nekotorye kineticheskie osobennosti sushki zhidkih dispersnyh produktov na tverdyh podlozhkah / A.N. Pahomov [i dr.] // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. 2017. № 11 (65). Ch. 4. S. 63–66. DOI: 10.23670/IRJ.2017.65.052.
5. Modelirovanie kinetiki sushki s analizom harakteristik processa / A.V. Zykov [i dr.] // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. 2020. № 11 (101). Ch. 1. S. 127–133. DOI: 10.23670/IRJ.2020.101.11.021.
6. Issledovanie processa sushki rastitel'nogo syr'ya / A.V. Zykov [i dr.] // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. 2020. № 11 (101). Ch. 1. S. 134-139 DOI: 10.23670/IRJ.2020.101.11.022.
7. Ulanbek K.A., Kochneva S.V. Razrabotka malogabaritnoj raspylitel'noj sushilki dlya sushki termolabil'nyh pischevyh produktov // Izvestiya Kyrgyzskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta im. I. Razzakova. 2020. № 3 (55). S. 385–389.
8. Dolinskij A.A., Maleckaya K.D. Raspylitel'naya sushka. M., 2015. 590 s.
9. Korotkova T.G., Danil'chenko A.S. Primenenie matematicheskoy modeli nestacionarnogo ispareniya zhidkih rastvorov dlya opisaniya kinetiki sushki fil'trata pivnoj drobinny // Vestnik KrasGAU. 2021. № 7. S. 204–210. DOI: 10.36718/1819-4036-2021-7-204-210.
10. Korotkova T.G., Danil'chenko A.S., Istoshina N.Yu. Issledovanie kinetiki sushki pivnoj drobinny // Izvestiya vuzov. Pischevaya tehn-

- logiya. 2020. № 4. S. 80–83. DOI: 10.26297/0579-3009.2020.4.19.
11. *Korotkova T.G., Danil'chenko A.S.* Sovershenstvovanie tehnologii pererabotki pivnoj drobiny v suhuyu kormovuyu dobavku // *Izvestiya vuzov. Pischevaya tehnologiya*. 2021. № 1. S. 59–62. DOI: 10.26297/0579-3009.2021.1.14.
12. *Danil'chenko A.S., Korotkova T.G., Ksandopulo S.Yu.* Kinetika ispareniya model'nogo rastvo-  
ra poslespirtovoj bardy, sodержaschego belok, maslo i sahar // *Izvestiya vuzov. Pischevaya tehnologiya*. 2018. № 1. S. 87–90.
13. *Danil'chenko A.S., Korotkova T.G., Ksandopulo S.Yu.* Kinetika processa ispareniya distillirovannoj vody pri sushke smesi voda – belok v izotermicheskikh usloviyah // *Izvestiya vuzov. Pischevaya tehnologiya*. 2018. № 4. S. 64–67.

Статья принята к публикации 21.12.2021 / The article accepted for publication 21.12.2021.

Информация об авторах:

**Татьяна Германовна Короткова**, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности, доктор технических наук, доцент

**Александра Сергеевна Данильченко**, ведущий инженер в управлении информатизации, ассистент кафедры безопасности жизнедеятельности, кандидат технических наук

**Наталья Юрьевна Истошина**, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности, кандидат технических наук

Information about the authors:

**Tatyana Germanovna Korotkova**, Professor at the Department of Life Safety, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

**Alexandra Sergeevna Danilchenko**, Leading Engineer at the Informatization Department; Assistant at the Department of Life Safety, Candidate of Technical Sciences

**Natalia Yurievna Istoshina**, Associate Professor at the Department of Life Safety, Candidate of Technical Sciences

