

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМА ВЫДЕЛЕНИЯ СЛОЕВ
В РАСЧЕТЕ КИНЕТИКИ СУШКИ
ДИСПЕРСНЫХ ПРОДУКТОВ НА ПОДЛОЖКАХ**

А. Н. Пахомов, Н. Ц. Гатапова, Ю. В. Пахомова

*Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»,
panpost@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: алгоритм; диффузия; жидкие дисперсные продукты; испарение; кинетика; массообмен; подложка; слой; сушка; теплообмен; теплопроводность.

Аннотация: Представлен анализ кинетических кривых сушки, формирующихся при высушивании на подложках жидких дисперсных продуктов. Выявлены основные особенности термограмм, связанные с процессом структурообразования в процессе нагрева и испарения высыхающего слоя продукта. На основании анализа состояния продукта в процессе сушки жидких дисперсных систем на подложках выявлено формирование специфических подслоев в высыхающей жидкости. Показано, что новые подслои формируются или вырождаются в зависимости от характера температурного поля и поля влажности. Предложен алгоритм выделения и эволюции таких подслоев в высыхающем продукте. Представлены результаты применения предлагаемого метода расчета кинетики сушки с учетом разработанного алгоритма формирования/вырождения слоев для расчета кинетики сушки жидкой послеспиртовой барды на подложке.

Обозначения

T_p, T_3 – соответственно расчетная и экспериментальная температуры, °С	δ – толщина подложки, мм;
T_c – температура сушильного агента, °С	$\delta_{\text{дисп}}$ – расчетная толщина высыхающего слоя, м;
g_p, g_3 – соответственно расчетная и экспериментальная убыль влаги, г;	τ – время, с;
	w – скорость, сушильного агента, м/с

Для моделирования процессов теплопроводности (диффузии) в материалах, подвергаемых сушке, необходимо классифицировать формы высушиваемых продуктов с геометрической точки зрения. Традиционно реальные формы высушиваемых материалов приводят к одной из канонических форм, к которым относят:

- пластину: по размерам выделяют конечноразмерные и бесконечные; по количеству слоев – одно- и многослойные;
- шар: по количеству слоев в теле – одно- и многослойные;
- цилиндр: по размерам – конечноразмерные и бесконечные; по количеству слоев – одно- и многослойные.

При моделировании тепловых и массообменных процессов возможно рассмотрение физически однослойного тела как многослойного. Такое искусственное выделение слоев оправдано при наличии в теле значительных градиентов температур и/или концентраций и сильной зависимости теплофизических свойств материала от них.

Как показывают результаты моделирования процессов сушки и термообработки дисперсных продуктов на подложках, выделение в материале слоев различной толщины позволит получить более корректное описание исследуемого процесса [1 – 5, 10]. Особенностью подобного выделения отдельных слоев в физически однослойном теле является возможность изменения количества и размеров слоев в процессе расчета. При этом появление или вырождения заданного слоя должно иметь под собой четкий физический смысл.

Для демонстрации физического механизма формирования и вырождения отдельных слоев в высушиваемом материале выбраны следующие характерные жидкие дисперсные продукты: послеспиртовая барда, мясокостная жидкость, жидкий пластификатор бетона на основе полиметиленафталинсульфонатов. В работах [2, 5 – 8, 11, 12] определены основные теплофизические свойства рассматриваемых жидких дисперсных продуктов и получены характерные термограммы их сушки на подложках.

На рисунке 1 представлены характерные термограммы, формирующиеся в процессе сушки исследуемых продуктов при выбранных режимах, где кривые приведены к единому масштабу по времени.

Термограмма сушки мясокостной жидкости является термограммой классической сушки простого капиллярно-пористого тела [3, 11, 12]. В процессе сушки мясокостной жидкости жидкая фаза не формирует на поверхности и в объеме тела никаких структур (пленок, агломератов, корок и т.п.). В этом случае для расчета кинетики сушки мясокостной жидкости на подложке систему «жидкость – подложка» можно рассматривать как двухслойную: первый слой – высушиваемая жидкость – изменяет свою толщину в начальном периоде сушки за счет поверхностного испарения влаги и постоянен по толщине во втором периоде; второй – подложка, как правило, монолитная, диффузионно-непроницаемая [12]. Для расчета тепло-массообмена при испарении с поверхности в первом периоде и критического влагосодержания рекомендуется использовать уравнения, полученные в работах [1 – 4].

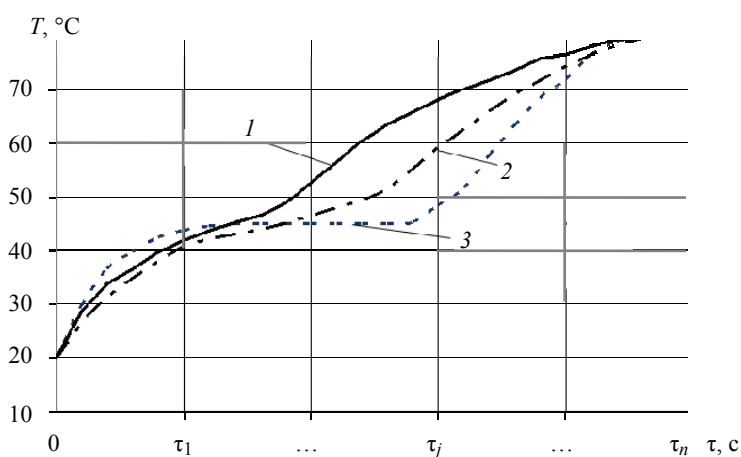


Рис. 1. Характерный вид термограмм сушки исследованных жидких дисперсных продуктов:

1 – пластификатор; 2 – послеспиртовая барда; 3 – мясокостная жидкость

Процесс сушки жидкой послеспиртовой барды можно разделить на отдельные этапы. При этом, в зависимости от этапа, слой высушиваемой жидкости можно разделять на несколько частей. На начальном этапе (от начала процесса сушки до появления на поверхности пленки) слой жидкости рассматривается как однородный, а система «высушиваемый продукт – подложка» – как двухслойная. Аналогично мясокостной жидкости один слой – подложка, второй – жидкость. Второй слой изменяет свою толщину в первом периоде сушки за счет поверхностного испарения влаги [12].

Второй этап характеризуется появлением на поверхности пленки. Характер появления и эволюции пленки в процессе сушки жидкой послеспиртовой барды на подложках подробно исследовался в работах [2, 5, 7, 8]. Там же отмечены характерные изменения термограммы сушки и даны уравнения, позволяющие рассчитать время начала формирования пленки. Таким образом, пленка создает дополнительный слой. Схема высыхающей на подложке жидкости становится трехслойной.

Далее в процессе сушки послеспиртовой барды слой пленки эволюционирует в более жесткую структуру – корку, под которой формируется подслой, по своим свойствам схожий со слоем пленки, формирующейся на предыдущем этапе [2, 5, 7, 12]. Кинетика процесса формирования слоя корки и его теплофизические свойства при сушке жидкой послеспиртовой барды исследовались в работах [2, 5, 7, 8]. Соответственно, в высушиваемом материале можно выделить дополнительный слой корки, при этом получаем четырехслойную схему [12].

Дальнейшее ведение процесса приводит к тому, что оставшийся слой жидкости уменьшается до полного исчезновения. Схема высыхающего на подложке продукта снова становится трехслойной. При этом на каждом этапе имеем слои разных свойств. В дальнейшем весь слой пленки приобретает свойства корки. Соответственно, можно убрать из рассмотрения один слой, и схема становится двухслойной: первый слой – сухой продукт, второй – подложка [4, 10, 12].

Исходя из анализа физических особенностей формирования определенных структур (для мясокостной жидкости и послеспиртовой барды), можно сделать вывод о возможности постановки задач переноса в многослойных телах канонической формы. Такие постановки позволяют решать подобного рода задачи не только численно, но и аналитически. При этом необходимо учитывать характер изменения геометрических размеров слоев и их свойств.

Процесс сушки жидкого пластификатора на подложке является наиболее сложным для анализа. Первоначально испарение идет с поверхности жидкого продукта, аналогично рассмотренным выше материалам. В определенный момент времени на поверхности испарения начинает формироваться структура – эластичная пленка. Визуально наблюдается пульсация жидкой фазы, находящейся между пленкой и подложкой. В процессе сушки жидкость испаряется из-под пленки с образованием воздушного пространства определенной геометрической формы. Процесс сушки происходит в режиме закрепления контактной линии. Соответственно характеру процесса сушки возможно выделение отдельных слоев в высыхающем материале, однако аналитическая постановка задачи переноса для пластификатора (вследствие наличия непредсказуемой геометрической деформации поверхностных слоев) возможна только в упрощенном виде [12].

Рассмотрим характер выделения/сокращения числа слоев. Для динамически изменяющегося числа слоев, в зависимости от механизма процесса, необходимо выделение схем и условий разделения и объединения слоев. Исходя из механизма структурообразования и его отражения на кинетических кривых, предлагаются следующие виды трансформации слоев, используемых в решении задачи переноса и связанных с изменениями в высыхающем продукте.

Возможные состояния слоя:

- жидкость;
- пленка;
- объемный остаток (корка).

Соответственно, наиболее удобно делить один слой на два и объединять два слоя в один.

Приведем пример разделения одного слоя на два: слой жидкости 0 разделяется на два: жидкость 1 и жидкость 2 (рис. 2).

В момент разделения слоя: $\delta_0 = \delta_1 + \delta_2$.

В дальнейшем для каждого слоя отдельно рассчитываются теплофизические свойства, граничные условия и толщина слоя по временным интервалам в границах существования слоя.

Границы существования слоя оцениваются по температурному полю. Условие разделения слоя: градиент температуры в начальном слое больше заданного порогового значения. Пороговое значение градиента оценено в 30°C , исходя из анализа результатов расчетов кинетики сушки для рассматриваемых жидкостей в исследуемом диапазоне режимных параметров по минимизации среднеквадратичного отклонения экспериментальных и расчетных данных (то есть некоторая интегральная характеристика). Блок-схема алгоритма разделения одного слоя на два представлена на рис. 3.

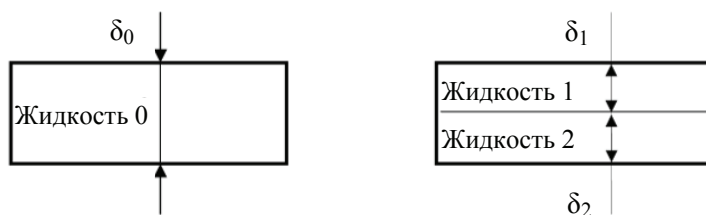


Рис. 2. Схема разделения одного слоя жидкости на два слоя жидкости с разными теплофизическими свойствами и размерами

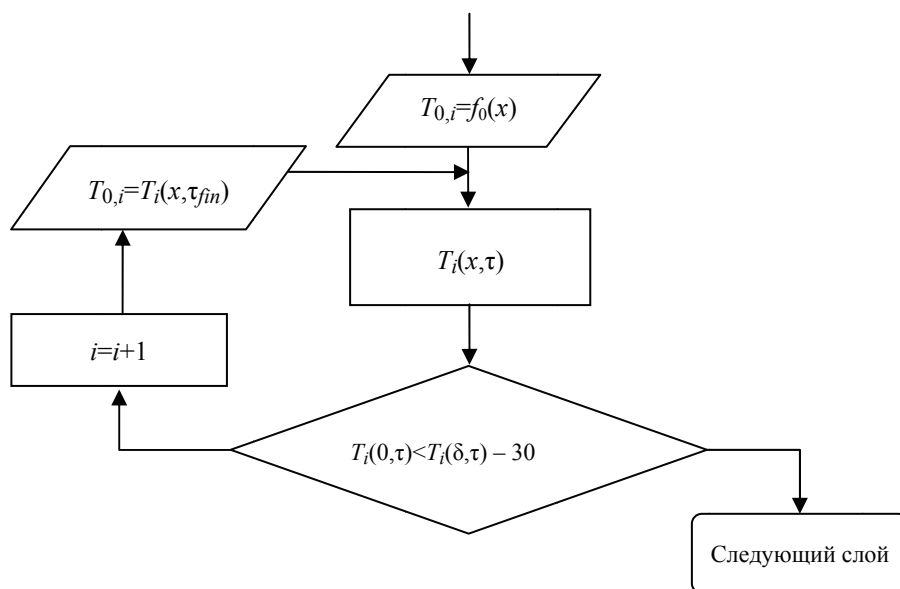


Рис. 3. Алгоритм разделения одного слоя на два

Температурное поле исходного слоя в момент разделения (конечный момент времени для исходного слоя и начальный – для двух формирующихся слоев) формирует температурные поля новых слоев либо в функционально заданном виде (для аналитического решения задачи переноса в виде распределения температуры в конечный момент времени), либо численно по координатам (в зависимости от метода решения, например по сетке). Данное правило справедливо для всех вариантов объединения и разделения слоев.

Расчет кинетики сушки дисперсных продуктов на подложках основан на применении аналитических постановок задач переноса в многослойных телах канонической формы с учетом изменения количества слоев (выделения/сокращения), их теплофизических свойств и размеров. Основное уравнение процесса переноса (теплопроводности/диффузии) в n -слойных телах канонической формы, имеет вид

$$\frac{\partial P(x, \tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 P(x, \tau)}{\partial^2 x} + \frac{\Gamma}{x} \frac{\partial P(x, \tau)}{\partial x} \right), \quad (1)$$

в котором принимаем для пластины $\Gamma = 0$, цилиндра $\Gamma = 1$, шара $\Gamma = 2$; a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$ [1 – 3].

Постановка задачи переноса (1) должна быть дополнена начальными и граничными условиями. В случае если $n > 1$ необходимо задание стыковых условий между слоями.

Как правило, в большинстве случаев, начальные условия задаются в виде некоторой функциональной зависимости (в явном виде или табличном). Выбор задаваемых граничных условий зависит от вида тепло-массообмена. Обычно граничные условия 1 рода оказываются упрощенными и не позволяют адекватно оценить условия теплообмена на границе (хотя активно используются при простых расчетах). Граничные условия 2 рода обычно применяются при описании интенсивного теплообмена излучением. Наиболее распространенными являются граничные условия 3 рода, характеризующие конвективный теплообмен. В случае процессов сушки на подложках необходимо применять несимметричные граничные условия. Для многослойных тел обычно используют стыковые условия, представленные как условия идеального теплового контакта.

В случае постоянства тепло-массообменных свойств, геометрии тела и граничных условий, на некотором временном интервале, получаем линейную замкнутую систему уравнений. Подобные системы уравнений хорошо решаются с применением аналитических (методы Фурье, функций Грина и интегральных преобразований) и численных (методы конечных элементов, конечных разностей) методов. Для получения решения нестационарных задач переноса, сопровождающихся изменением свойств продукта, характера граничных условий, геометрических размеров тела (при сохранении канонической формы) применяем хорошо себя зарекомендовавшие интервальные методы, разработанные и используемые в работах [1 – 5, 9 – 11].

Представим результаты расчета кинетики сушки с учетом разработанного алгоритма формирования/вырождения слоев для жидкой послеспиртовой барды на подложке. Режим сушки – конвективная, $T_c = 80$ °С, $w = 5$ м/с, подложка – фторопласт $\delta = 2$ мм. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных приведены в табл. 1 и на рис.4.

Разработка алгоритма выделения слоев в физически однородном высушиваемом продукте, а также получение зависимостей для временных границ существования слоев позволяют моделировать процессы сушки жидких дисперсных продуктов при наличии поверхностных явлений с использованием аналитических постановок задач переноса в многослойных телах канонической формы и интервальных методов их решений.

**Результаты расчета кинетики сушки жидкой послеспиртовой барды
на мягком режиме**

τ	T_3	T_p	g_3	g_p	$\delta_{дисп}$	Слои		
0	15,6	15,98	1,34	1,34	0,002	Ж	–	–
30	35,3	36,66	1,12	1,07	0,002		Ж	–
60	38,6	39,64	0,94	0,95	0,0019			Пл
90	39,8	40,70	0,81	0,83	0,00161		Пл	–
120	40,7	41,36	0,68	0,71	0,00138			–
150	41,5	42,28	0,57	0,60	0,00111			–
180	42,2	43,01	0,48	0,50	0,00089			–
210	43,7	43,56	0,42	0,41	0,00064			–
240	46,6	48,51	0,29	0,33	0,00042			–
270	51	55,56	0,24	0,25	0,00038			–
300	57,5	60,39	0,17	0,18	0,00032			К
330	63,5	63,64	0,13	0,12	0,00026			К
360	70	72,83	0,07	0,07	0,00021			Пл
390	75	77,31	0,05	0,05	0,0002	К	–	
420	78	78,31	0,02	0,03				
460	79	78,61	0,00	0,01				
500	80	79,30		0,00				
540	80	80,00		0,00				

Примечание. Ж – жидкость; К – корка; Пл – пленка.

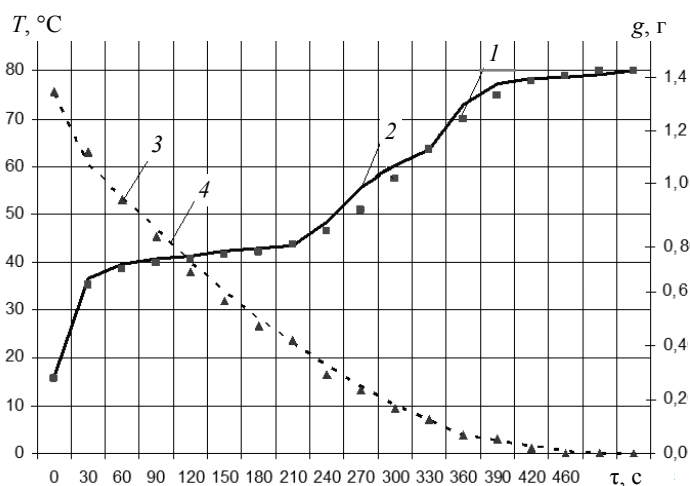


Рис. 4. Результаты расчета кинетики сушки жидкой послеспиртовой барды:

1 – T_3 ; 2 – T_p ; 3 – g_3 ; 4 – g_p

Список литературы

1. Гатапова, Н. Ц. Кинетика и моделирование процессов сушки растворителей, покрытий, дисперсий, растворов и волокнистых материалов: единый подход : дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.08 / Гатапова Наталья Цибиковна. – Тамбов, 2005. – 554 с.
2. Пахомова, Ю. В. Кинетика сушки капель жидких дисперсий на диффузионно-непроницаемых подложках : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Пахомова Юлия Владимировна. – Тамбов, 2011. – 283 с.
3. Пахомов, А. Н. Развитие научных основ сушки дисперсных материалов, осложненной структурообразованием : дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.08 / Пахомов Андрей Николаевич. – Тамбов, 2020. – 431 с.
4. Пахомов, А. Н. Моделирование и расчет кинетики сушки жидких дисперсных продуктов на подложках / А. Н. Пахомов, Н. Ц. Гатапова, Ю. В. Пахомова. – Тамбов : Тамб. гос. техн. ун-т, 2016. – 160 с.
5. Пахомов, А. Н. Сушка капель жидких дисперсных продуктов / А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова. – М. : Перо, 2013. – 122с.
6. О температурных площадках при низко- и высокотемпературной кондуктивно-барабанной сушке влажных материалов / Н. Ц. Гатапова, В. И. Коновалов, А. Н. Колиух, А. Н. Пахомов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2004. – Т. 10, № 4-1. – С. 968 – 977.
7. Пахомова, Ю. В. Особенности механизма и кинетики сушки капель дисперсий (на примере сушки послеспиртовой барды) / Ю. В. Пахомова, В. И. Коновалов, А. Н. Пахомов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 1. – С. 70 – 82.
8. Коновалов, В. И. Геометрия, циркуляция и тепломассоперенос при испарении капли на подложке / В. И. Коновалов, А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 371 – 387.
9. Пахомов, А. Н. Возможности самоорганизации дисперсных систем при сушке на подложке / А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова, Е. А. Ильин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 3. – С. 633 – 637.
10. Пахомов, А. Н. Алгоритм расчета кинетики испарения капли с диффузионно-непроницаемой подложки / А. Н. Пахомов, Е. А. Ильин // Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2013. – № 2 (46). – С. 292 – 296.
11. Пахомов, А. Н. Типы кинетических кривых, получаемых при сушке капель жидких дисперсных продуктов / А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова // Химическая технология. – 2014. – Т. 15, № 10. – С. 620 – 623.
12. Гатапова, Н. Ц. Особенности механизма и кинетики сушки жидких дисперсных продуктов на подложках / Н. Ц. Гатапова, А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе : материалы Первых Междунар. Лыковских науч. чтений, посвящ. 105-летию академика А. В. Лыкова, 22–23 сентября 2015 г., Москва. – Курск, 2015. – С. 42 – 47.

Using the Algorithm for Separating Layers in Calculating the Kinetics of Drying Disperse Products on Substrates

A. N. Pakhomov, N. Ts. Gatapova, Yu. V. Pakhomova

*Department of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety,
panpost@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: algorithm; diffusion; liquid dispersed products; evaporation; kinetics; mass transfer; substrate; layer; drying; heat exchange; thermal conductivity.

Abstract: The analysis of the kinetic curves of drying, which are formed during drying on substrates of liquid dispersed products, is presented. The main features of thermograms associated with the process of structure formation during heating and evaporation of the drying layer of the product are revealed. Based on the analysis of the state of the product in the process of drying liquid dispersed systems on substrates, the formation of specific sublayers in the drying liquid was revealed. It is shown that new sublayers are formed or degenerate depending on the nature of the temperature and humidity fields. An algorithm for the selection and evolution of such sublayers in a drying product is proposed. The results of applying the proposed method for calculating the kinetics of drying, taking into account the developed algorithm for the formation/degeneration of layers for calculating the kinetics of drying liquid distillery stillage on a substrate are presented.

References

1. Gatapova N.Ts. *PhD Dissertation (Technical)*, Tambov, 2005, 554 p. (In Russ.)
2. Pakhomova Yu.V. *PhD Dissertation (Technical)*, Tambov, 2011, 283 p. (In Russ.)
3. Pakhomov A.N. *PhD Dissertation (Technical)*, Tambov, 2020, 431 p. (In Russ.)
4. Pakhomov A.N., Gatapova N.Ts., Pakhomova Yu.V. *Modelirovaniye i raschet kinetiki sushki zhidkikh dispersnykh produktov na podlozhkakh* [Modeling and calculation of the kinetics of drying liquid dispersed products on substrates], Tambov: Tambovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2016, 160 p. (In Russ.)
5. Pakhomov A.N., Pakhomova Yu.V. *Sushka kapel' zhidkikh dispersnykh produktov* [Drying drops of liquid disperse products], Moscow: Pero, 2013, 122 p. (In Russ.)
6. Gatapova N.Ts., Konovalov V.I., Koliukh A.N., Pakhomov A.N. [About temperature areas in low- and high-temperature conductive drum drying of wet materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2004, vol. 10, no. 4-1, pp. 968-977. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Pakhomova Yu.V., Konovalov V.I., Pakhomov A.N. [Peculiarities of the mechanism and kinetics of drying droplets of dispersions (on the example of post-alcohol vinasse drying)], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 1, pp. 70-82. (In Russ., abstract in Eng.)
8. Konovalov V.I., Pakhomov A.N., Pakhomova Yu.V. [Geometry, circulation and heat and mass transfer during droplet evaporation on a substrate], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 2, pp. 371-387. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Pakhomov A.N., Pakhomova Yu.V., Il'in Ye.A. [Possibilities of self-organization of dispersed systems during drying on a substrate], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 3, pp. 633-637. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Pakhomov A.N., Il'in Ye.A. [Algorithm for calculating the kinetics of droplet evaporation from a diffusion-impermeable substrate], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2013, no. 2 (46), pp. 292-296. (In Russ., abstract in Eng.)
11. Pakhomov A.N., Pakhomova Yu.V. [Types of kinetic curves obtained by drying drops of liquid dispersed products], *Khimicheskaya tekhnologiya* [Chemical technology], 2014, vol. 15, no. 10, pp. 620-623. (In Russ.)
12. Gatapova N.Ts., Pakhomov A.N., Pakhomova Yu.V. *Aktual'nyye problemy sushki i termovlazhnostnoy obrabotki materialov v razlichnykh otraslyakh promyshlennosti i agropromyshlennom komplekse* [Actual problems of drying and

thermal and moisture processing of materials. in various industries and agro-industrial complex], Proceedings of the First International Lykov Scientific Readings dedicated to the 105th anniversary of Academician A. V. Lykov, 22-23 September, 2015, Moscow, Kursk, 2015, pp. 42-47. (In Russ.)

Verwendung des Schichtauswahlalgorithmus bei der Berechnung der Kinetik des Trocknens dispergierter Produkte auf Substraten

Zusammenfassung: Es ist eine Analyse der kinetischen Trocknungskurven vorgestellt, die sich beim Trocknen auf Substraten von flüssig dispergierten Produkten bilden. Die Hauptmerkmale von Thermogrammen, die mit dem Prozess der Strukturbildung während des Erhitzens und Verdampfens der Trocknungsschicht des Produkts verbunden sind, sind aufgezeigt. Auf der Grundlage der Analyse des Produktzustands während der Trocknung von flüssig dispergierten Systemen auf Substraten ist die Bildung spezifischer Unterschichten in der Trocknungsflüssigkeit aufgedeckt. Es ist gezeigt, dass je nach Art des Temperaturfeldes und des Feuchtigkeitsfeldes neue Unterschichten gebildet oder degeneriert werden. Ein Algorithmus für die Auswahl und Entwicklung solcher Unterschichten in einem Trocknungsprodukt ist vorgeschlagen. Es sind die Ergebnisse der Anwendung des vorgeschlagenen Verfahrens zur Berechnung der Trocknungskinetik unter Berücksichtigung des entwickelten Algorithmus für die Bildung/Degeneration von Schichten zur Berechnung der Kinetik der Trocknung von flüssiger Brennereischlempen auf einem Substrat vorgestellt.

Utilisation de l'algorithme de la sélection des couches dans le calcul de la cinétique du séchage des produits dispersés sur substrats

Résumé: Est présentée une analyse des courbes cinétiques du séchage formées lors du séchage sur substrats des produits dispersés liquides. Sont déduites les principales caractéristiques des thermogrammes associés au processus de la formation de la structure dans le processus de chauffage et d'évaporation de la couche du séchage du produit. A la base de l'analyse de l'état du produit dans le processus du séchage des systèmes de dispersion liquide sur les substrats, est révélée la formation des sous-couches spécifiques dans le liquide d'extraction. Est démontré que de nouvelles sous-couches se forment ou dégèrent en fonction de la nature du champ de température et du champ d'humidité. Est proposé l'algorithme de la sélection et de l'évolution de telles sous-couches dans le produit du séchage. Sont présentés les résultats de l'application de la méthode proposée du calcul de la cinétique du séchage en tenant compte de l'algorithme élaboré de la formation/dégénérescence des couches pour le calcul de la cinétique du séchage de la barde post-alcool liquide sur substrat.

Авторы: *Пахомов Андрей Николаевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Пахомова Юлия Владимировна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ПГТУ», Тамбов, Россия.