

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТИПА КИНЕТИЧЕСКОЙ КРИВОЙ В ПРОЦЕССЕ СУШКИ КАРТОФЕЛЬНОЙ МЕЗГИ

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

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

Ключевые слова: картофельная мезга; кинетика; прогнозирование; сушка; термограмма.

Аннотация: Показано применение метода прогнозирования типа кинетических кривых сушки дисперсных продуктов, на примере различных способов сушки картофельной мезги. Дано описание экспериментальных установок, реализующих конвективную, кондуктивную и инфракрасную сушку. Представлены полученные при различных режимах термограммы и кривые сушки. Приведены результаты прогнозирования кинетики сушки картофельной мезги для мягких и жестких режимов сушки. Положения разработанного метода прогнозирования можно распространять на более широкий класс продуктов, в том числе на коллоидные системы, за счет уточнения значений лимитирующих факторов.

Обозначения

$T, T_{\text{экв}}$ – измеряемая и эквивалентная температуры соответственно, °С;	g – масса образца, г;
X_i – факторы модели прогноза;	w – скорость потока, м/с;
Φ – критерий формирования поверхностной структуры;	q – удельный теплоподвод, Вт/м ² ;
	τ – время, с

Картофель является основным продуктом, используемым для получения крахмала. Помимо картофеля, крахмал может быть получен путем переработки зерен кукурузы, пшеницы или риса. Основной отход при производстве крахмала из сельскохозяйственных культур – мезга. Картофельная мезга – сложная дисперсная система, представляющая собой остаток очищенного, измельченного, растертого картофеля, полученный после стадии извлечения крахмала.

Основная часть твердой фазы картофельной мезги представляет собой частицы, размер которых характерен для коллоидных систем. Однако зачастую в мезге также присутствуют более крупные, например частицы кожуры картофеля, полученной после его очистки. Влажность свежей картофельной мезги зависит от технологии обработки клубней и может достигать 90 %. В мезгу крупную и мелкую переходит от 3 до 7 % массы абсолютно сухих веществ картофеля в зависимости от крахмалистости сорта картофеля и степени его измельчения в терочных машинах.

Картофельная мезга является ценным кормовым продуктом, в состав которого входит до 50 % крахмала, 12 % клетчатки, 3 % растворимых углеводов, 6–7 % протеина. Животным картофельную мезгу скармливают в свежем, силосованном или высушенном виде.

Высокое содержание влаги в исходной картофельной мезге делает ее транспортировку нерентабельной. Также сырая картофельная мезга быстро подвергается микробиологической порче при температуре уже выше 15 °С. На практике полученную сырую картофельную мезгу, как правило, обезвоживают тем или иным способом (отжимом, силосованием, сушкой).

Для исследования кинетики сушки предоставлен образец картофельной мезги, основные показатели которой, полученные в результате анализа по методикам, использованным в работах [2, 3], составляли, %: влажность – 85; клетчатка – 14; зола – 0,35; редуцирующие сахара – 0,7; крахмал – 12.

Полученные данные достаточно хорошо согласуются с результатами других исследователей, полученными в работах по анализу состава картофельной мезги, например [1]. Это указывает на удовлетворительное соблюдение технологии получения крахмала на предприятиях РФ и хорошую воспроизводимость свойств продукта вне зависимости от производителя.

Для проведения исследований по сушке представленных образцов картофельной мезги использовались оригинальные экспериментальные установки, реализующие конвективную, кондуктивную и инфракрасную сушку.

На рисунке 1 представлена схема экспериментальной многорежимной сушильной установки для исследования кинетики конвективной сушки; рис. 2 и 3 – соответственно схемы кондуктивной сушилки и экспериментальной установки, используемой для изучения кинетики инфракрасной сушки. Данные установки традиционно используются авторами в исследованиях кинетики сушки промышленных продуктов [4, 5].

Приведем примеры кинетических кривых, полученных экспериментально при различных вариантах проведения процесса сушки картофельной мезги, а также покажем их классификацию по [6] (во всех вариантах в качестве подложки использован алюминий).

На рисунке 4, а, б, представлены кинетические кривые конвективной сушки образца картофельной мезги при мягком режиме: $T = 100$ °С, $w = 5$ м/с. Наблюдается вырождение (отсутствие) на термограмме площадки мокрого термометра. Соответственно, по классификации [6] экспериментально получаем тип – 2-0.

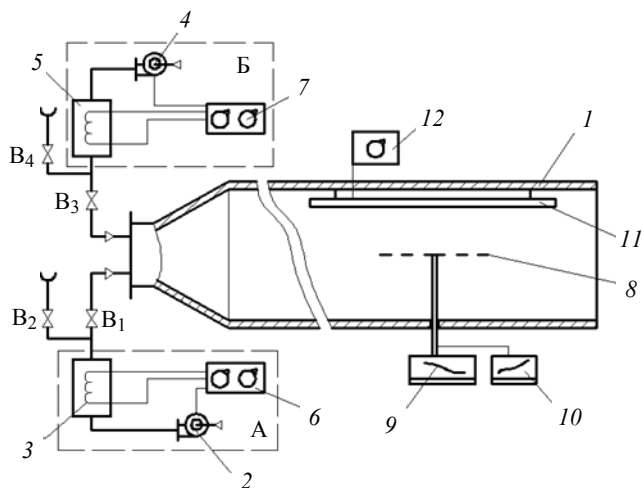


Рис. 1. Схема экспериментальной многорежимной сушильной установки:

1 – сушильная камера; 2, 4 – вентиляторы; 3, 5 – калориферы; 6, 7 – системы управления блоками теплоподвода; 8 – траверса весов; 9 – динамические весы; 10 – электронный самописец; 11 – излучатель; 12 – система управления излучателем; А, Б – блоки управления; В₁ – В₄ – вентили

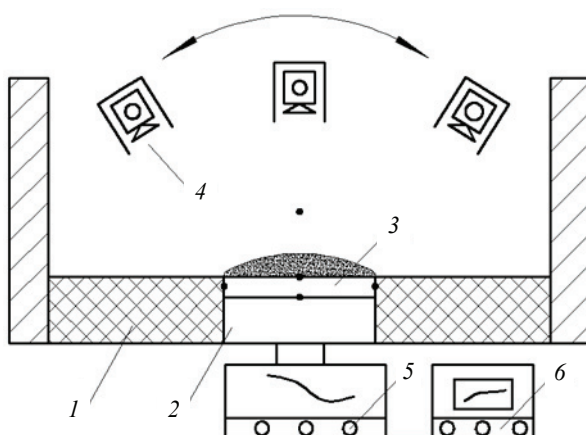


Рис. 2. Схема кондуктивной сушилки:

1 – теплоизолированный корпус; 2 – тепловыделяющий элемент; 3 – подложка с дозирующим продуктом; 4 – цифровой микроскоп в герметичном термокожухе; 5 – динамические веса; 6 – электронный самописец; • – места установки термопар

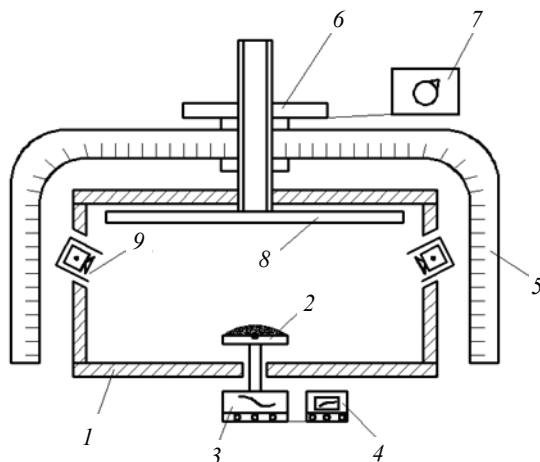


Рис. 3. Схема экспериментальной ИК-сушилки:

1 – шкаф; 2 – подложка; 3 – динамические веса; 4 – электронный самописец; 5, 6, 7 – системы соответственно позиционирования, крепления излучателя, управления излучателем; 8 – излучатель (показан развернуто); 9 – видеокamera или микроскоп в герметичном термокожухе

На рисунке 4, в, з, представлены кинетические кривые конвективной сушки образца картофельной мезги при жестком режиме: $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$, $w = 5\text{ м/с}$. Наблюдается вырождение (отсутствие) на термограмме площадки мокрого термометра и выраженная площадка кипения в районе $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. По классификации [6] экспериментально получаем тип – 5-0.

На рисунке 5 показаны кинетические кривые кондуктивной сушки образца картофельной мезги при жестком режиме: $T = 155\text{ }^{\circ}\text{C}$. Наблюдается вырождение (отсутствие) на термограмме площадки мокрого термометра и выраженная площадка кипения в районе $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. По классификации [6] экспериментально получаем тип – 5-0.

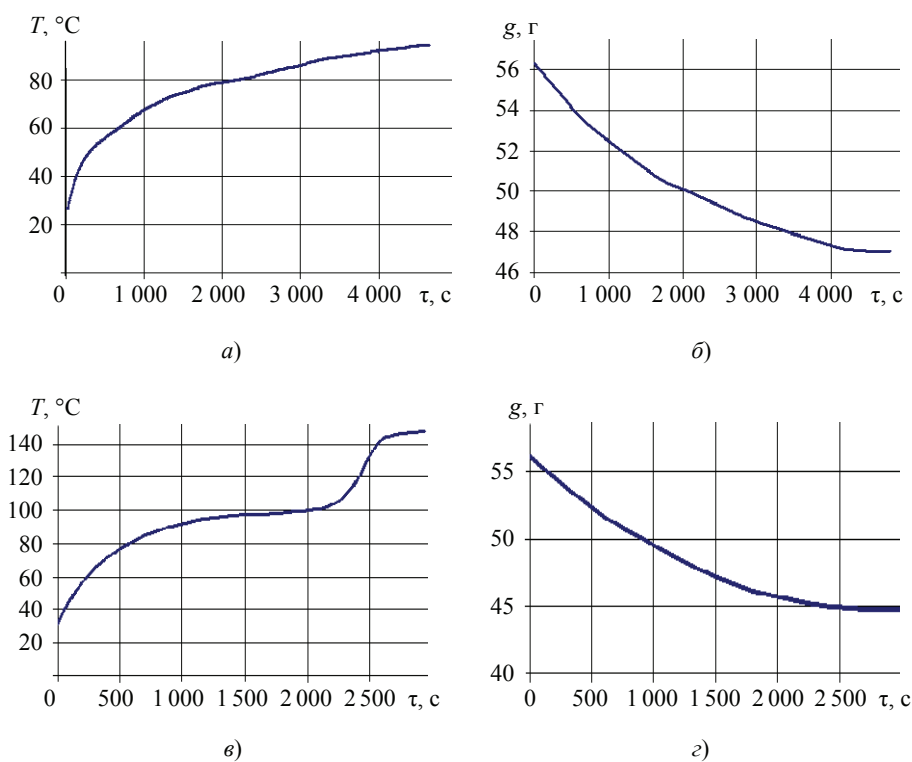


Рис. 4. Кинетические кривые конвективной сушки ($w = 5\text{ м/с}$) образца картофельной мезги при мягком (а, б): $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и жестком (в, г): $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ режимах: а, в – термограммы; б, г – кривые сушки

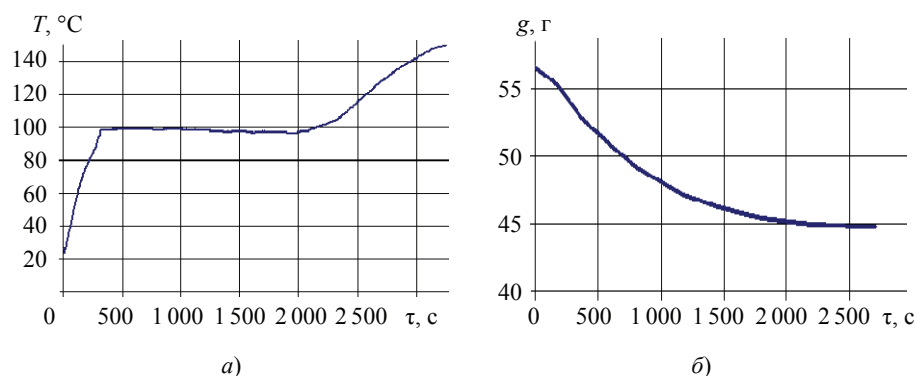


Рис. 5. Кинетические кривые кондуктивной сушки образца картофельной мезги при жестком режиме $T = 155\text{ }^{\circ}\text{C}$: а – термограмма; б – кривая сушки

На рисунке 6 представлены кинетические кривые инфракрасной сушки образца картофельной мезги при жестком режиме: $T_{\text{ЭКВ}} = 210\text{ }^{\circ}\text{C}$. Наблюдается вырождение (отсутствие) на термограмме площадки мокрого термометра и деформация площадки кипения, выражающаяся в монотонном росте температуры и наличии точки перегиба в районе площадки кипения. По классификации [6] экспериментально получаем тип – 5-5.

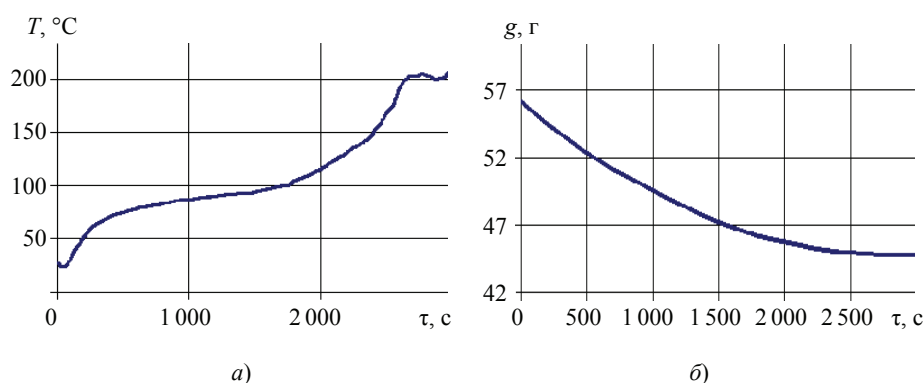


Рис. 6. Кинетические кривые инфракрасной сушки образца картофельной мезги при жестком режиме $T_{\text{экв}} = 210$ °С:
a – термограмма; *б* – кривая сушки

Рассмотрим применение положений метода прогнозирования [6] для сушки картофельной мезги, как продукта, который по размерам частиц твердой фазы можно отнести к коллоидным системам. Определим прогнозируемый тип кинетической кривой при сушке на мягком режиме. Исходные данные для прогнозирования: конвективная сушка исходного образца картофельной мезги на алюминиевой подложке (толщина подложки – 1 мм) при температуре 100 °С и $w = 5$ м/с.

Оцениваем факторы для модели мягких режимов.

Исходя из полученных показателей (см. с. 2), по концентрации твердой фазы оцениваем $X_1 = 2$ [6]. Расширяя оценки фактора лимитирующего размера частиц для коллоидных систем, оцениваем $X_2 = 3$ [6]. По концентрации твердых растворенных веществ в жидкой фазе картофельной мезги оцениваем $X_3 = 1$ [6].

Оцениваем величину теплоподвода к высушиваемому продукту по формуле [6]

$$q = \frac{\lambda}{\delta}(T_c - T_n) + \alpha(T_c - T_n),$$

где T_c – температура сушильного агента, °С; T_n – начальная температура материала, °С; λ – коэффициент теплопроводности подложки, Вт/м К; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²К; δ – толщина подложки, м;

$$q = \frac{236}{0,01}(100 - 20) + 50(100 - 20) = 1,9 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2.$$

Исходя из рекомендаций [6], выбираем значение $X_4 = 2$. Рассчитываем значение Φ для мягкого режима сушки [6]

$$\Phi = 1,23 \cdot 2 + 1,1 \cdot 3 + 0,72 \cdot 1 + 1,4 \cdot 2 = 9,28.$$

Согласно [6], для значения $\Phi = 9,28$ получаем вид площадки $T_{\text{м.т}} = 4$ (отсутствие площадки мокрого термометра). Тип кинетической кривой –2-0. Экспериментально получен тип 2-0 (см. рис. 4, *a*, *б*).

Определим прогнозируемый тип кинетической кривой при сушке на жестком режиме для конвективного теплоподвода. Исходные данные для прогнозирования: конвективная сушка исходного образца картофельной мезги на алюминиевой подложке (толщина подложки – 1 мм) при температуре 150 °С и $w = 5$ м/с.

Оцениваем факторы для модели жестких режимов. В этом случае необходим расчет критерия Φ_1 для мягкого режима при условии оценки фактора $X_4 = 3$. Соответственно, исходя из полученных показателей (см. с. 2), по концентрации твердой фазы оцениваем $X_1 = 2$ [6]. Аналогично мягким режимам, расширяем оценки фактора лимитирующего размера частиц для коллоидных систем и оцениваем $X_2 = 3$ [6]. По концентрации твердых растворенных веществ в жидкой фазе картофельной мезги оцениваем $X_3 = 1$ [6].

Рассчитываем значение Φ_1 для мягкого режима сушки [6]

$$\Phi_1 = 1,23 \cdot 2 + 1,1 \cdot 3 + 0,72 \cdot 1 + 1,4 \cdot 3 = 10,68.$$

Согласно [6], для значения $\Phi_1 = 10,68$ получаем вид площадки $T_{м.т} = 4$.

Оцениваем величины факторов $X_5 - X_7$, используемых для расчета значения Φ_2 по модели жестких режимов. По лимитирующему размеру частиц оцениваем $X_5 = 2$. По концентрации растворенных веществ в жидкой фазе $X_6 = 1$ [6]. Исходя из величины температуры сушильного агента, оцениваем $X_7 = 2$ [6].

Рассчитываем значение Φ_2

$$\Phi_2 = 1 \cdot 2 + 1,25 \cdot 1 + 0,8 \cdot 2 = 4,85.$$

Согласно [6], для значения $\Phi_2 = 4,85$ получаем вид площадки $T_{кип} = 1$ (выраженная площадка кипения).

Соответственно, для вида $T_{м.т} = 4$ и $T_{кип} = 1$, получаем тип кинетической кривой –5-0. Экспериментально получен тип 5-0 (см. рис. 4, в, з).

Определим прогнозируемый тип кинетической кривой при сушке на жестком режиме для кондуктивного теплоподвода. Исходные данные для прогнозирования: кондуктивная сушка исходного образца картофельной мезги на алюминиевой подложке (толщина подложки – 1 мм) при температуре 155 °С. Оцениваем факторы для модели жестких режимов [6]. Расчет значения Φ_1 аналогичен вышеприведенному расчету для мягкого режима конвективной сушки (см. рис. 5).

Определим прогнозируемый тип кинетической кривой при сушке на жестком режиме для инфракрасного теплоподвода. Задано: инфракрасная сушка исходного образца картофельной мезги на алюминиевой подложке (толщина подложки – 1 мм) при эквивалентной температуре 210 °С.

Оцениваем факторы для модели жестких режимов.

Для жестких режимов необходим расчет критерия Φ_1 для мягкого режима при условии оценки фактора $X_4 = 3$. Соответственно, исходя из полученных ранее показателей по концентрации твердой фазы оцениваем $X_1 = 2$ [6]. Аналогично мягким режимам, расширяем оценки фактора лимитирующего размера частиц для коллоидных систем и оцениваем $X_2 = 3$ [6]. По концентрации твердых растворенных веществ в жидкой фазе картофельной мезги оцениваем $X_3 = 1$ [6].

Рассчитываем значение Φ_1 для мягкого режима сушки [6]

$$\Phi_1 = 1,23 \cdot 2 + 1,1 \cdot 3 + 0,72 \cdot 1 + 1,4 \cdot 3 = 10,68.$$

Согласно [6], для значения $\Phi_1 = 10,68$ получаем вид площадки $T_{м.т} = 4$.

Оцениваем величины факторов $X_5 - X_7$, используемых для расчета значения Φ_2 по модели жестких режимов. По лимитирующему размеру частиц оцениваем $X_5 = 2$. По концентрации растворенных веществ в жидкой фазе $X_6 = 1$ [6]. Исходя из величины эквивалентной температуры, оцениваем $X_7 = 3$ [6].

Рассчитываем значение Φ_2

$$\Phi_2 = 1 \cdot 2 + 1,25 \cdot 1 + 0,8 \cdot 3 = 5,65.$$

Согласно [6], для значения $\Phi_2 = 5,65$ получаем вид площадки $T_{\text{кип}} = 3$ (рост значения температуры в районе площадки кипения с выраженной точкой перегиба).

Соответственно, для вида $T_{\text{MT}} = 4$ и $T_{\text{кип}} = 3$, получаем тип кинетической кривой – 5-5. Экспериментально получен тип 5-5 (см. рис. 6).

Таким образом, положения разработанного метода прогнозирования [6] можно расширять на более широкий класс продуктов, таких как коллоидные системы, за счет уточнения значений лимитирующего фактора X_2 , характеризующего дисперсный состав продукта. Также рекомендуется в качестве лимитирующего размера принимать значение эквивалентного диаметра частиц, который не превышает 30 % частиц дисперсной фазы.

Список литературы

1. Использование вторичных ресурсов производства картофелепродуктов в качестве сырья для производства крахмала на малотоннажных линиях / Н. Р. Андреев, Д. Н. Лукин, Л. В. Кривцун, В. А. Бызов // Достижения науки и техники АПК. – 2015. – Т. 29, № 12. – С. 108 – 110.

2. Анализ свойств жидкой послеспиртовой барды / А. Н. Пахомов, Р. Ю. Банин, И. Г. Елисеева, Е. А. Черных // Наука в центральной России. – 2013. – № 1. – С. 67 – 70.

3. Опыт использования влагомера в исследованиях кинетики сушки жидкого лигносульфоната / А. Н. Пахомов, С. В. Васенина, И. А. Бирюкова [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 3 (50). – URL : ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5206 (дата обращения: 18.01.2022).

4. Некоторые особенности сушки пастообразных материалов на подложках / А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова, Е. А. Хатунцева, В. А. Елизарова // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 2-2 (36). – URL : ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3017 (дата обращения: 18.01.2022).

5. Некоторые кинетические особенности сушки жидких дисперсных продуктов на твердых подложках / А. Н. Пахомов, С. В. Васенина, И. А. Бирюкова [и др.] // Междунар. науч.-исслед. журнал. – 2017. – № 11-4 (65). – С. 63 – 66. doi: 10.23670/IRJ.2017.65.052

6. Пахомов, А. Н. Моделирование и расчет кинетики сушки жидких дисперсных продуктов на подложках / А. Н. Пахомов, Н. Ц. Гагапова, Ю. В. Пахомова. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. – 160 с.

Prediction of the Type of Kinetic Curve in the Process of Drying Potato Pulp

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

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

Keywords: potato pulp; kinetics; forecasting; drying; thermogram.

Abstract: The application of the method for predicting the type of kinetic curves for drying dispersed products is shown, using the example of various methods for drying potato pulp. A description is given of experimental setups that implement convective, conductive, and infrared drying. Thermograms and drying curves obtained under various modes are presented. The results of forecasting the kinetics of drying potato pulp for soft and hard drying modes are presented. Provisions of the developed forecasting method can be extended to a wider class of products, including colloidal systems, by refining the values of the limiting factors.

References

1. Andreyev N.R., Lukin D.N., Krivitsun L.V., Byzov V.A. [The use of secondary resources for the production of potato products as a raw material for the production of starch on low-tonnage lines], *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* [Achievements of science and technology of the APK], 2015, vol. 29, no. 12, pp. 108-110. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Pakhomov A.N., Banin R.Yu., Yeliseyeva I.G., Chernykh Ye.A. [Analysis of the properties of liquid distillery stillage], *Nauka v tsentral'noy Rossii* [Science in Central Russia], 2013, no. 2S, pp. 57-60. (In Russ., abstract in Eng.)
3. <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5206> (accessed 18 January 2022).
4. <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3017> (accessed 18 January 2022).
5. Pakhomov A.N., Vasenina S.V., Biryukova I.A., Pozdnysheva I.G., Kombarova Ye.Yu. [Some kinetic features of drying liquid dispersed products on solid substrates], *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International research journal], 2017, no. 11-4 (65), pp. 63-66, doi: 10.23670/IRJ.2017.65.052 (In Russ., abstract in Eng.)
6. 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: Izdatel'stvo FGBOU VO «TGTU», 2016, 160 p. (In Russ.)

Vorhersage der Art der kinetischen Kurve bei der Trocknung der Kartoffelpülpe

Zusammenfassung: Die Anwendung der Methode der Vorhersage der Art der kinetischen Trocknungskurven von dispergierten Produkten ist am Beispiel verschiedener Methoden zum Trocknen von Kartoffelpülpe gezeigt. Es ist die Beschreibung der experimentellen Anlagen gegeben, die konvektive, konduktive und Infrarottrocknung implementieren. Die in verschiedenen Modi erhaltenen Thermogramme und Trocknungskurven werden präsentiert. Die Ergebnisse der Vorhersage der Kinetik des Trocknens von Kartoffelpülpe für weiche und harte Trocknungsbedingungen sind angeführt. Es ist gezeigt, dass die Bestimmungen der entwickelten Prognosemethode auf eine breitere Produktklasse, einschließlich kolloidaler Systeme, ausgedehnt werden können, indem die Werte der limitierenden Faktoren geklärt werden.

Prédiction du type de courbe cinétique dans le processus de séchage de la purée de pommes de terre

Résumé: Est montrée l'application de la méthode de la prédiction du type des courbes cinétiques de séchage des produits dispersés à l'exemple de différentes méthodes de séchage de la pomme de terre. Est donnée une description des installations expérimentales mettant en œuvre le séchage par convection, conduction et infrarouge. Sont présentés les thermogrammes et les courbes de séchage obtenus sous différents modes. Sont cités les résultats de la prédiction de la cinétique de séchage du mélange des pommes de terre pour les régimes séchage souples et rigides. Est montré que les dispositions de la méthode de la prévision développée peuvent être étendues à une classe plus large de produits, y compris les systèmes colloïdaux, compte tenu de la précision des valeurs des facteurs limitants.

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 «ТГТУ», Тамбов, Россия.