УДК 66.047
DOI: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.279-288

К РАСЧЕТУ КИНЕТИКИ НАГРЕВА И СУШКИ МНОГОСЛОЙНЫХ ДИСПЕРСНЫХ ПРОДУКТОВ НА ПОДЛОЖКАХ

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

Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; panpost@yandex.ru

Ключевые слова: аналитическое решение; аппроксимация; испарение; диффузия; интервальный метод; критериальные уравнения; подложка; послеспиртовая барда; слой; тепломассообмен; теплопроводность.

Аннотация: На основе анализа механизма процесса сушки жидких дисперсных продуктов на подложках (на примере сходных по теплофизическим показателям продуктов: мясокостной жидкости, послеспиртовой барды и жидкого пластификатора) показано различие кинетики процесса и механизма формирования слоев высыхающего продукта в процессе сушки. Приведены характерные термограммы сушки исследуемых продуктов в сходных режимах. Представлен подход к решению задач теплопроводности (диффузии) в многослойных телах. Рассмотрен способ применения аналитических и численных решений задач переноса в телах с изменяющимися теплофизическими свойствами, границами и числом слоев. Показана область применения подобных решений. Приведена схема формирования отдельных слоев высыхающего на подложке материала на примере сушки жидких дисперсных продуктов. Дана постановка и решение линейной задачи переноса в однослойной бесконечной пластине. Показан подход для использования полученных решений для задач с наличием миграционно-осадочных, структурно-деформационных и физико-химических явлений в процессе сушки. Представлены постановка и решение задачи переноса в однослойной бесконечной пластине с изменяющимися во времени теплофизическими свойствами и границами слоя.

Обозначения

A – коэффициент;
a – коэффициент температуропроводности;
c – теплоемкость, Дж/(кг·К);
l – определяющий размер, м;
P – потенциал (концентрация или температура);
x – координата, м;
Γ – коэффициент формы;
λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);
μ – собственные числа;
ρ – плотность, кг/м^3;
τ – время, с.

Для описания процессов теплопроводности (диффузии) в материалах, подвергаемых сушке, выделим следующие геометрические формы тел: а) одно- и многослойная бесконечная пластина (ткани); б) одно- и многослойный шар (гранулы); в) одно- и многослойный бесконечный цилиндр (корд, шнуры, нити).

Многослойные системы применяются не только для описания процессов теплопроводности (диффузии) в физически многослойных телах, но и могут использоваться для описания процесса в физически однослойном теле, если какие-либо его свойства сильно изменяются по одной или нескольким координатам. Как показал опыт исследования кинетики сушки волокнистых материалов и жидких дисперсных систем на подложках, наиболее полное физическое приближение задачи к реальным условиям обеспечивает рассмотрение исследуемого тела как многослойного (имеющего, как правило, от двух до четырех слоев) [1 – 9]. При этом слои могут как появляться, так и вырождаться в процессе расчета.

Рассмотрим характер появления слоев в процессе высушивания трех жидких дисперсных продуктов: мясокостной жидкости, послеспиртовой барды и жидкого пластификатора на основе натриевых солей полиметиленнафталинсульфокислот. В таблице представлены основные свойства рассматриваемых жидких дисперсных продуктов.

Очевидно, что основные свойства данных жидких дисперсных продуктов примерно одинаковы. Однако характер высыхания таких продуктов, механизм формирования слоев в процессе сушки и термограммы различны.

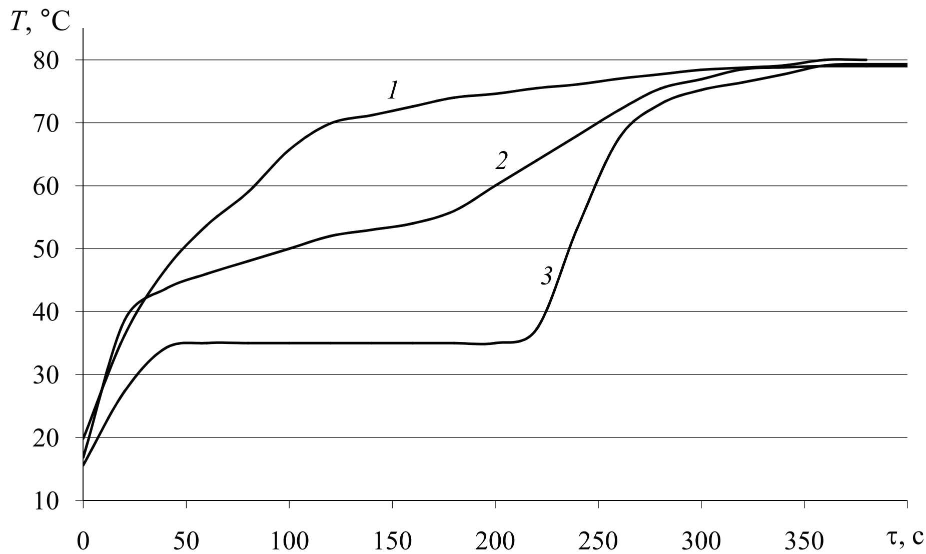
Процесс сушки мясокостной жидкости очень схож по термограмме с классической сушкой простого капиллярно-пористого тела (рис. 1, линия *3*). Жидкая фаза в процессе сушки не формирует на поверхности и в объеме тела никаких структур (пленок, агломератов, корок и т.п.). Задачу расчета кинетики сушки мясокостной жидкости можно рассматривать как двухслойную. Первый слой – диффузионно-непроницаемая подложка. Второй – слой жидкости, изменяющий свою толщину в первом периоде сушки. Во втором периоде толщина слоя остатка не меняется. Уравнения для расчета интенсивности испарения в первом периоде, расчет критического влагосодержания представлены в работах [1 – 4].

Послеспиртовая барда в процессе сушки ведет себя более сложно (см. рис. 1, линия *2*). Разделим процесс сушки на отдельные этапы. На первом этапе (в начальный момент времени) до появления на поверхности жидкости пленки в расчете рассматривается двухслойная задача. Первый слой – диффузионно-непроницаемая подложка, второй – слой жидкости, изменяющий свою толщину в процессе высыхания.

Слой пленки в процессе высыхания эволюционирует в жесткую корку, под которой остается подслой, схожий по свойствам со слоем пленки [2, 4, 7, 10]. Кинетика формирования слоя корки исследована в работах [2, 4] и момент начала ее формирования можно рассчитать. Таким образом, формируется еще один слой – корка, и задача становится четырехслойной.

Свойства жидких дисперсных продуктов

Продукт	Плотность, кг/м^3	Вязкость, мПа·с	Влажность, %
Мясокостная жидкость	1012…1100	1,05…1,12	86…90
Послеспиртовая барда	1050…1120	1,10…1,15	90…92
Жидкий пластификатор	1185	1,12…1,15	80…95



Характерные термограммы сушки жидких дисперсных продуктов:
1 – жидкий пластификатор; *2* – послеспиртовая барда; *3* – мясокостная жидкость

В процессе высыхания жидкая фаза испаряется, слой жидкости уменьшается до полного исчезновения. Таким образом, вырождается один слой. Задача становится трехслойной. Дальнейшее ведение процесса приводит к вырождению слоя пленки в слой корки. Задача становится двухслойной: один слой – подложка, второй – слой высохшего материала [11– 14].

Характер высыхания на подложке жидкого пластификатора еще более сложен. Сначала испарение идет с поверхности жидкого продукта. Затем на поверхности формируется эластичная пленка и наблюдается явление пульсации жидкости под пленкой. В процессе высыхания жидкость из под пленки удаляется с образованием воздушной прослойки. Поверхностная пленка (в режиме закрепления контактной линии на подложке) поднимается вверх, опускается, различным образом деформируется с образованием поверхности сложной геометрической формы, хотя на термограмме практически не отображаются особенные точки (см. рис. 1, линия *1*).

Исходя из физических особенностей процесса сушки рассмотренных жидких дисперсных продуктов следует вывод, что в случае мясокостной жидкости и послеспиртовой барды для расчета кинетики процесса сушки можно применять аналитические решения задач переноса в многослойных телах канонической формы с учетом изменения теплофизических свойств и геометрических размеров слоев. Для сушки жидкого пластификатора аналитическая постановка возможна только в упрощенном виде.

Общее уравнение, описывающее процесс теплопроводности (диффузии) в многослойных телах рассматриваемой геометрии, имеет вид

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

где $\Gamma = 0$, $\Gamma = 1$, $\Gamma = 2$ – коэффициенты формы соответственно для пластины, цилиндра и шара.

Для получения решения уравнение (1) дополним начальными (**НУ**), граничными (**ГУ**) и стыковыми (**СУ**) условиями.

Начальные условия по слоям могут быть заданы различными способами: в виде конкретной функции, безградиентные НУ и таблично заданной функции. Наиболее распространены ГУ первого, второго и третьего рода. На практике ГУ первого рода часто оказываются чрезмерно упрощенными, неточными или сложными функциями времени. Представить граничное условие в виде ГУ второго рода удается обычно для интенсивного теплоподвода излучением. Наиболее удобными для применения являются ГУ третьего рода. Для пластины в общем случае применяем несимметричные граничные условия. Стыковые условия записываем как условия идеального теплового контакта, известные так же как ГУ четвертого рода.

Таким образом, получаем замкнутую систему уравнений, линейность которой обеспечивается постоянством тепломассопереносных свойств, внешних условий и геометрии тела [12 – 14].

Для получения решения поставленной задачи теплопроводности (диффузии) в многослойных телах применяются различные методы. Из аналитических методов наиболее широко используются методы: Фурье (разделения переменных), функций Грина (источников), интегральных преобразований. Для практических решений обычно определяющим является простота освоения и применения метода и меньшая громоздкость получаемого решения. В данной работе для получения примера аналитического решения задачи теплопроводности (диффузии) использован метод разделения переменных – метод Фурье.

Численные решения подобных задач получаются с использованием методов конечных элементов, конечных разностей и т.п. Наиболее удобно и эффективно применять готовые решатели, реализованные в таких пакетах, как COMSOL Multiphysics, ANSYS, ELCUT и др.

Покажем на примере простой однослойной задачи переноса в бесконечной пластине способ получения решения при наличии миграционно-осадочных, структурно-деформационных и физико-химических явлений в одном слое.

Приведем пример аналитического решения линейной задачи теплопроводности (диффузии) в однослойной бесконечной пластине с ГУ первого рода и безградиентными НУ.

Постановка задачи переноса имеет вид:

$$\frac{\partial P(x,\tau)}{\partial \tau} = a^2 \frac{\partial^2 P(x,\tau)}{\partial^2 x}, \qquad a = \sqrt{\frac{\lambda}{c\rho}}; \tag{2}$$

$$P(0,\tau) = P_{c1}; \tag{3}$$

$$P(l,\tau) = P_{c2}; \tag{4}$$

$$P(x,0) = \varphi(x) = P_0 = \text{const}. \tag{5}$$

где P_{c1}, P_{c2} – потенциалы различных сред.

Решение задачи (2) – (5), полученное методом Фурье:

$$P(x,\tau) = \frac{P_{c2} - P_{c1}}{l} x + P_{c1} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(\mu_n x) \exp\left(-(\mu_n a)^2 \tau\right), \tag{6}$$

где

$$\mu_n = \frac{n\pi}{l}, \qquad n = 1, 2, \ldots, \infty; \tag{7}$$

$$A_n = \frac{2}{l}\left[-\frac{P_0}{\mu_n}\left(\cos(\mu_n l) - 1\right) - \left(-\frac{P_{c1}}{\mu_n}\left[\cos(\mu_n l) - 1\right] + \right.\right.$$

$$\left.\left. + \frac{P_{c2} - P_{c1}}{l}\left[\frac{1}{\mu_n^2}\sin(\mu_n l) - \frac{l}{\mu_n}\cos(\mu_n l)\right]\right)\right]. \qquad (8)$$

Решения, полученные методом Фурье, справедливы для линейных систем уравнений, для чего необходимо постоянство тепломассопереносных свойств, внешних условий и геометрии тела. Отметим, что расчеты, выполненные на основе линейных постановок задач теплопроводности (диффузии), не всегда приводят к корректным результатам. Особенно часто существенные расхождения расчетных и экспериментальных данных наблюдаются в тех случаях, когда в процессе изменяются определенные свойства продукта или его геометрические размеры. Поэтому необходимо учитывать влияние на кинетику процесса миграционно-осадочных, структурно-деформационных и физико-химических явлений. Полный учет их в аналитической форме приводит к весьма сложным, зачастую нерешаемым, задачам. Соответственно необходимо выделение характеристик, вносящих наибольший вклад в кинетику процесса, и их учет в аналитическом решении.

Для этой цели наиболее эффективно использовать так называемые интервальные методы, разработанные под руководством профессора В. И. Коновалова и используемые в большинстве работ его научной школы [1 – 10, 12, 13]. Данные методы позволяют применять аналитические решения для задач теплопроводности (диффузии), осложненные изменением граничных условий, свойств высыхающего продукта, геометрических размеров тела, появлением определенных структур на поверхности и в объеме тела во времени.

Основная идея интервального метода состоит в том, что процесс разбивается по времени на определенные интервалы $\Delta\tau$. Длительность каждого интервала $\Delta\tau$ определяется характером изменения граничных условий, свойств высыхающего продукта, геометрических размеров тела, появлением определенных структур в зависимости от температуры, концентрации или времени процесса. Для решения задачи выделяют первый, предыдущий и последующий интервалы. Для каждого интервала, по предварительно полученным зависимостям, изменяющиеся коэффициенты принимаются кусочно-постоянными. Таким образом, задача тепломассопереноса для каждого интервала линеаризуется. Для первого интервала задача решается с учетом начальных условий, заданных в нулевой момент времени. Соответственно, в момент времени $\Delta\tau$, в решении получено распределение температуры, заданное в виде функции. Для следующего временного интервала в качестве начального условия принимается распределение температуры, полученное на предыдущем интервале времени в момент $\Delta\tau$ (то есть фактически в конце предыдущего интервала).

Полученная функция, описывающая распределение температуры в конце предыдущего временнóго интервала, является рядом Фурье, представляющим решение задачи в конечный момент времени $\Delta\tau$ для предыдущего интервала. Наличие аналитического вида функции позволяет представить полученное температурное поле в последующем интервале времени в качестве начальных условий.

Таким образом, для получения аналитического решения для первого, последующего и предыдущего интервалов времени необходимо получить решение поставленной в начале линейной задачи в аналитическом виде.

Приведем пример получения аналитического решения для задачи теплопроводности (диффузии) для интервального метода в однослойной пластине с нулевыми ГУ первого рода и безградиентными НУ при изменении теплофизических свойств слоя.

Постановка задачи:

$$\frac{\partial P(x,\tau)}{\partial\tau}=a^2\frac{\partial^2 P(x,\tau)}{\partial^2 x},\qquad a=\sqrt{\frac{\lambda}{c\rho}},\qquad a=f(P(x,\tau))\neq\mathrm{const}\,; \tag{9}$$

$$P(0,\tau)=0; \tag{10}$$

$$P(l,\tau)=0; \tag{11}$$

$$P(x,0)=\varphi(x)=P_0=\mathrm{const}. \tag{12}$$

Решение задачи (9) – (12), полученное для a = const, имеет вид:

$$P(x,\tau)=\sum_{n=1}^{\infty}A_n\sin(\mu_n x)\exp\left(-(\mu_n a)^2\tau\right), \tag{13}$$

где

$$\mu_n=\frac{n\pi}{l},\qquad n=1,2,\ldots,\infty; \tag{14}$$

$$A_n=-\frac{2P_0}{l\mu_n}\left(\cos(\mu_n l)-1\right). \tag{15}$$

В случае наличия функциональной зависимости $a=f(P(x,\tau))$ необходимо решать задачу по заданным временным интервалам. При этом на каждом интервале времени необходимо рассчитывать свои теплофизические свойства (например, плотность, теплопроводность и т.п.) и начальное распределение температуры, полученное в расчете как конечное распределение температуры из предыдущего интервала. Таким образом, для интервального метода, получаем:

1) для первого интервала

$$P_1(x,\tau)=\sum_{n=1}^{\infty}A_n\sin(\mu_n x)\exp\left(-(\mu_n a)^2\tau\right), \tag{16}$$

где значения A_n, μ_n определяются из (14), (15);

2) для последующих интервалов решение записывается для начала и конца интервала

$$P_{\text{н}}(x,\tau)=\sum_{k=1}^{\infty}A_k\sin(\mu_k x)\exp\left(-(\mu_k a)^2\tau\right), \tag{17}$$

где A_k , μ_k – в начале интервала известны (они рассчитываются как переменные в конце предыдущего интервала) и принимаются для данного интервала как константы;

$$P_{\text{к}}(x,\tau)=\sum_{n=1}^{\infty}A_n\sin(\mu_n x)\exp\left(-(\mu_n a)^2\tau\right)=$$

$$=\sum_{n=1}^{\infty}\left[\frac{2}{l}\int_0^l\varphi(x)\sin(\mu_n x)dx\right]\sin(\mu_n x)\exp\left(-(\mu_n a)^2\tau\right). \tag{18}$$

В решении для конца интервала в качестве начального распределения температуры $\varphi(x)$ необходимо взять распределение температуры в конце предыдущего интервала, т. е. $\varphi(x)=P_{\text{н}}(x,\tau)$

$$P_{\text{к}}(x,\tau) = \frac{1}{l}\sum_{n=1}^{\infty}\left(\sum_{k=1}^{\infty} A_{\text{к}} \exp\left(-\mu_k^2 a_k^2 \tau_k\right)\left[\frac{\sin\left(l(\mu_k - \mu_n)\right)}{\mu_k - \mu_n} - \frac{\sin\left(l(\mu_k + \mu_n)\right)}{\mu_k + \mu_n}\right]\right)\times$$

$$\times \sin(\mu_n x)\exp\left(-\mu_n^2 a_n^2 \tau_n\right), \qquad (19)$$

т. е. фактически

$$P_{\text{к}}(x,\tau) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(\mu_n x)\exp(-\mu_n^2 a_n^2 \tau), \qquad (20)$$

где

$$A_n = \frac{1}{l}\sum_{k=1}^{\infty} A_k \exp\left(-\mu_k^2 a_k^2 \tau_k\right)\left[\frac{\sin\left(l(\mu_k - \mu_n)\right)}{\mu_k - \mu_n} - \frac{\sin\left(l(\mu_k + \mu_n)\right)}{\mu_k + \mu_n}\right], \qquad (21)$$

τ_k – продолжительность интервала.

Уравнения (16) – (21) фактически представляют собой аналитическое решение задачи переноса с изменяющимися в процессе теплофизическими свойствами или граничными условиями.

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 : защищена 10.06.2005 / 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 : защищена 23.12.2011 / Пахомова Юлия Владимировна. – Тамбов, 2011. – 283 с.

3. Пахомов, А. Н. Кинетика сушки дисперсий на твердых подложках : дис. … канд. техн. наук : 05.17.08 : защищена : 16.03.2001 / Пахомов Андрей Николаевич. – Тамбов, 2000. – 225 с.

4. Пахомов, А. Н. Сушка капель жидких дисперсных продуктов / А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова – М. : Перо, 2013. – 122 с.

5. О температурных площадках при высокотемпературной кондуктивно-барабанной сушке влажных материалов / Н. Ц. Гатапова [и др.] // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2004. – Т. 10, № 4А. – С. 968 – 977.

6. 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.

7. 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.

8. Коновалов, В. И. О возможностях использования точных, интервальных и приближенных аналитических методов в задачах тепло- и массопереноса в твердых телах / В. И. Коновалов, Е. Н. Туголуков, Н. Ц. Гатапова // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 1995. – Т. 1, № 1-2. – С. 75 – 90.

9. К расчету внутреннего тепло- и массопереноса и кинетики сушки и нагрева волокнистых материалов / В. И. Коновалов [и др.] // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 1997. – Т. 3, № 3. – С. 224 – 236.

10. Пахомов, А. Н. Типы кинетических кривых, получаемых при сушке капель жидких дисперсных продуктов / А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова // Хим. технология. – 2014. – № 10. – С. 620 – 623.

11. 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.

12. Пахомов, А. Н. Расчет кинетики сушки капли жидкости на подложке / А. Н. Пахомов, Б. Ш. Д. Аль Саиди, Е. А. Ильин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 2. – С. 339 – 345.

13. Пахомов, А. Н. Алгоритм расчета кинетики испарения капли с диффузионно-непроницаемой подложки / А. Н. Пахомов, Е. А. Ильин // Вопр. современ. науки и практики. Ун-т им. В. И. Вернадского. – 2013. – № 2(45). – С. 292 – 296.

14. Пахомова, Ю. В. Оценка качества готового продукта при сушке жидких дисперсных веществ / Ю. В. Пахомова, В. И. Коновалов // Вопр. соврем. науки и практики. Ун-т им. В.И. Вернадского. – 2011. – № 2(33). – С. 407 – 412.

Calculation of the Kinetics of Heating and Drying Multilayer Dispersed Products on Substrates

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

Department "Technological Processes, Devices and Technosphere Safety", TSTU; panpost@yandex.ru

Keywords: analytical solution; approximation; criteria equations; evaporation; diffusion; distillery dregs; heat and mass transfer; interval method; layer; the substrate; thermal conductivity.

Abstract: Based on the analysis of the mechanism of the drying process of liquid disperse products on substrates (e.g., thermo-physical parameters of similar products: meat and bone fluid, distillery dregs and liquid plasticizer) we show the difference of the kinetics and mechanism of formation of the layers of the product during the drying process. We developed typical thermograms of drying of the investigated products under similar conditions. We offer an approach to solving the problems of heat conduction (diffusion) in multilayer bodies. The authors consider a way of the application of analytical and numerical solutions to the problems of heat transfer in the bodies with varying thermal properties, boundaries and number of layers. The scope of such solutions is shown. The scheme of formation of the individual layers of the drying material on the substrate is exemplified by drying of liquid disperse products. We formulated and found solution of linear transfer problem in a single-layer infinite plate. The authors shoed the possibility of applying the obtained solutions to the problems dealing with migratory and sedimentary phenomena, structural deformation and physical and chemical phenomena in the drying process. The formulation and solution of heat transfer problems in an infinite plate with single-layer time-varying thermal properties and the layer boundaries was carried out.

References

1. Gatapova N.Ts. *Doctoral Dissertation (Engineering)*, Tambov, 2005, 554 p.

2. Pakhomova Yu.V. *PhD Dissertation (Engineering)*, Tambov, 2011, 283 p.

3. Pakhomov A.N. *PhD Dissertation (Engineering)*, Tambov, 2000, 225 p.
4. Pakhomov A.N., Pakhomova Yu.V. *Sushka kapel' zhidkikh dispersnykh produktov* (Drying of liquid droplets dispersed products), Moscow: Pero, 2013, 122 p.
5. Gatapova, N.Ts. Konovalov V.I., Koliukh A.N., Pakhomov A.N. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2004. vol. 10, no. 4A, pp. 968-977.
6. Pakhomova Yu.V., Konovalov V.I., Pakhomov A.N. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 1, pp. 70-82.
7. Konovalov V.I., Pakhomov A.N., Pakhomova Yu.V. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 2, pp. 371-387.
8. Konovalov V.I., Tugolukov E.N., Gatapova N.Ts. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 1995, vol. 1, no. 1-2, pp. 75-90.
9. Konovalov V.I., Tugolukov E.N., Gatapova N.Ts., Hanooni S.S., Korobova I.L., Pakhomov A.N., Sergeeva E.A. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 1997, vol. 3, no. 3, pp. 224-236.
10. Pakhomov, A.N., Pakhomova Yu.V. *Khimicheskaya Technologiya*, 2014, no. 10, pp. 620-623.
11. Pakhomov A.N., Pakhomova Yu.V., Il'in E.A. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 3, pp. 633-637.
12. Pakhomov A.N., Al Saedi B.Sh.D., Il'in E.A. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 2, pp. 339-345.
13. Pakhomov A.N., Il'in E.A. *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo*, 2013, no. 2(45), pp. 292-296.
14. Pakhomova Yu.V., Konovalov V.I. *Voprosy sovremennoi nauki praktiki. Universitet imeni V. I. Vernadskogo*, 2011, no. 2(33), pp. 407-412.

Zur Berechnung der Kinetik der Erwärmung und des Trocknens der mehrschichtigen dispersen Produkte auf den Unterlagen

Zusammenfassung: Aufgrund der Analyse des Mechanismus des Prozesses des Trocknens der flüssigen dispersen Produkte auf den Unterlagen (am Beispiel der nach den wärme-physikalischen Kennziffern ähnlichen Produkte: der Fleischknochenflüssigkeit, der Nachspiritusschlempe und des flüssigen Plastifikators) ist der Unterschied der Kinetik des Prozesses und des Mechanismus der Bildung der Schichten des vertrocknenden Produktes im Laufe des Trocknens angeführt. Es sind die charakteristischen Thermogramme des Trocknens der untersuchenden Produkte in den ähnlichen Regimes angeführt. Es ist das Herangehen an die Lösung der Aufgaben der Wärmeleitfähigkeit (der Diffusion) in den mehrschichtigen Körper vorgelegt. Es ist die Weise der Anwendung der analytischen und numerischen Lösungen der Aufgaben der Versetzung in den Körpern mit den sich ändernden wärme-physikalischen Eigenschaften, den Grenzen und der Zahl der Schichten betrachtet. Es ist das Gebiet der Anwendung der ähnlichen Lösungen gezeigt. Es ist das Schema der Bildung der abgesonderten Schichten des auf der Unterlage vertrocknenden Materials, am Beispiel des Trocknens der flüssigen dispersen Produkte angeführt. Es ist die Stellung und die Lösung der linearen Aufgabe der Versetzung in der einschichtigen unendlichen Platte gegeben. Es ist das Herangehen für die Nutzung der bekommenen Lösungen für die Aufgaben mit dem Vorhandensein der migrations-sedimentären, physikal-chemischen und Strukturdeformationserscheinungen im Laufe des Trocknens gezeigt. Es ist die Stellung und die Lösung der Aufgabe der Versetzung in der einschichtigen unendlichen Platte mit den sich in der Zeit ändernden wärme-physikalischen Eigenschaften und den Grenzen der Schicht dargelegt.

Vers le calcul de la cinétique du chauffage et du séchage des produits dispersés multicouches sur les substitutions

Résumé: A la base de l'analyse du mécanisme du processus du séchage des produits dispersés multicouches sur les substitutions (à l'exemple des produits du liquide des os de la viande pareils par ses indices thermophysiques, de la drêche et de l'émollient liquide) est montrée la différence de la cinétique du produit au cours du séchage. Sont citées les thermogrammes typiques du séchage pareil dans les régimes pareils. Est montrée une approche envers l'application des problèmes de la conductibilité (diffusion) dans les corps multicouches. Est montré le domaine de l'application de telles solutions. Est cité le schéma de la formation des couches du matériel séché sur la substitution. Est montrée une approche avec l'application des solutions reçues pour les problèmes avec la présence des phénomènes migratoires et sédimantaires, structurellement déformés et thermopysiques au cours du séchage. Est donnée la solution du problème du transfert dans une plaque infinie à une couche avec les propriétés thermophysiques et limites de la couche qui changent dans le temps.

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

Рецензент: ***Брянкин Константин Вячеславович*** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Химия и химические технологии», начальник учебно-методического управления, ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
