

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА В ГРАВИТАЦИОННО-ДВИЖУЩЕМСЯ МОНОСЛОЕ НА МИКРОКИНЕТИЧЕСКОМ УРОВНЕ

А.А. Шевцов<sup>1,2</sup>, Т.Н. Тертычная<sup>3</sup>, С.С. Куликов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный университет инженерных технологий, г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия,

<sup>3</sup>Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, г. Воронеж, Россия

Нелинейность дифференциальных уравнений тепломассопереноса А.В. Лыкова и сложность в экспериментальном определении неизвестных коэффициентов, входящих в них, не позволяют получить аналитического решения, что обусловлено зависимостью коэффициентов переноса от температуры и влагосодержания материала. Известные аналитические решения получены лишь для тел канонической формы (пластина, цилиндр, шар). Однако эти решения громоздки и сложны по структуре, что сдерживает их практическое применение. Для построения математической модели процесса конвективной сушки в работе сформулированы упрощающие допущения: форма частицы рассматривалась в виде неограниченного цилиндра; пренебрегалось аксиальной теплопроводностью, термодиффузией, теплопроводностью отдельной частицы. Применение теоретических методов микрокинетики непрерывной сушки дисперсных материалов, основанных на описании кинетики сушки единичных частиц, сформулированных упрощений, начальных и граничных условий позволили получить систему дифференциальных уравнений в безразмерном виде, описывающую процесс сушки единичной частицы при прямоточно-противоточном продувании агента сушки через гравитационно-движущийся монослой высушиваемого материала. Данная система уравнений является упрощенной (не учитываются температурные градиенты, термодиффузия, распределенность источника теплоты в самой частице) и решена методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности. Приводится графическая интерпретация результатов моделирования на примере сушки семян льна, получившего широкое применение в производстве технического масла. Погрешность моделирования не превышает 12,5 %.

*Ключевые слова:* моделирование, сушка, микрокинетика, дисперсный материал.

## ВВЕДЕНИЕ

При описании микрокинетики сушки дисперсных материалов в гравитационно-движущемся монослое использована подвижная (лагранжевая) системы координат, связанная с центром отдельной частицы, перемещающейся в под действием сил гравитации. Данный подход предполагает описание кинетики сушки единичных частиц с последующим обобщением этого описания на весь движущийся монослой [1-2].

Преимущество описания микрокинетики сушки единичных частиц состоит в возможности рассчитывать не только изменение среднего влагосодержания частицы во времени, но и поле влагосодержаний в ней, что во многих случаях представляет интерес. Кроме того, параллельно получают информацию о кинетике нагрева частицы, что важно для термолабильных материалов [1-2].

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для построения математической модели процесса сушки единичной частицы сформулированы следующие упрощающие допущения: форма частицы рассматривалась в виде неограниченного цилиндра; пренебрегалось аксиальной (вдоль оси симметрии, параллельной образующей цилиндрической

поверхности) теплопроводностью, термодиффузией, теплопроводностью отдельной частицы.

Математическая модель процесса сушки единичной частицы в виде системы уравнений, связывающих температуру  $\theta$  и влагосодержание  $u$ , записана в цилиндрической системе координат:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + w \frac{\partial u}{\partial x} - a_m(\tau) \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u}{\partial r} \right) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + w \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{A(v)}{c' \gamma'} (\theta - t_c) - \frac{r}{c'} \left[ \frac{\partial \bar{u}}{\partial \tau} + w \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right] = 0, \quad (2)$$

где

$$\bar{u}(\tau, x) = \frac{2}{R^2} \int_0^R r u(\tau, x, r) dr,$$

с граничными условиями

$$u(\tau, 0, r) = u^o(\tau, r) \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial u(\tau, x, r)}{\partial r} \right|_{r=R} = - \frac{B(t, v)}{a_m(\theta)} (u_R - u_p), \quad u_R < u_p, \quad (4)$$

с начальными условиями

$$u(0, x, r) = u_0(x, r), \quad \theta(0, x) = \theta_0(x) \quad (5)$$

и с условиями симметрии

$$\left. \frac{\partial u(\tau, x, r)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \theta(\tau, 0) = f(\tau) \quad (6)$$

В уравнениях (1) – (6) приняты следующие обозначения:  $\tau$  – время, с;  $x$  – пространственная координата по длине сушильного тракта, м;  $r$  – координата вдоль радиуса частицы, м;  $w$  – скорость движения частицы в аппарате, м/с;  $v$  – скорость сушильного агента на входе в монослой, м/с;  $\alpha_m$  – коэффициент диффузии влаги, м<sup>2</sup>/с;  $t_c$  – температура сушильного агента, °С;  $c'$  – теплоемкость дисперсных частиц, кДж/(кг·К);  $r$  – удельная теплота парообразования, кДж/кг;  $A$  – эмпирический коэффициент теплообмена, кДж/(м<sup>3</sup>·К);  $B$  – эмпирический коэффициент массообмена,  $B = \beta$ ,  $\beta$  – коэффициент массоотдачи, кг/[м<sup>2</sup>·с·(кг/м<sup>3</sup>)];  $\gamma$  – насыпная плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $u_0$ ,  $\theta_0$  – соответственно начальное распределение влагосодержания, кг/кг и температуры, К, слоя частиц по длине сушильного тракта,  $u^0$  – влагосодержание частиц дисперсного слоя на входе в сушилку;  $p$ ,  $R$  – индексы соответствующие равновесному влагосодержанию и влагосодержанию на поверхности частицы.

Система (1) – (6) описывает процесс сушки частиц цилиндрической формы при прямоточно-противоточном продувании агента сушки через гравитационно-движущийся монослой дисперсного материала.

Система уравнений (1) – (6) приведена к безразмерному виду:

$$\frac{\partial U}{\partial Fo} + \frac{\partial U}{\partial X} = Lu \left( \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} + \frac{1}{Z} \frac{\partial U}{\partial Z} \right), \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial Fo} + \frac{\partial T}{\partial X} = -Nu' T + Ko Bi'_m U_R, \quad (8)$$

где  $U_R = U(Fo, X, Z)|_{z=1}$ ;

с граничным условием

$$\left. \frac{\partial U(Fo, X, Z)}{\partial Z} \right|_{z=1} = -Bi'_m U_R; \quad (9)$$

с начальными условиями

$$U(Fo, X, Z)|_{Fo=0} = 1, \quad T(Fo, X, Z)|_{Fo=0} = 1, \quad (10)$$

и условиям симметрии

$$\left. \frac{\partial U(Fo, X, Z)}{\partial Z} \right|_{z=0} = 0. \quad (11)$$

В уравнениях (7) – (11):

$X = \frac{x}{PeR}$ ,  $Z = \frac{r}{R}$  – безразмерные координаты;  $Pe = \frac{wR}{a}$  –

критерий Пекле;  $T = \frac{t_c - \theta}{t_c - \theta_0}$  – безразмерная температура;

$U = \frac{u - u_p}{u_0 - u_p}$  – безразмерное влагосодержание;  $Fo = \frac{a\tau}{R^2}$  –

критерий Фурье;  $Lu = \frac{a_m}{a}$  – критерий Лыкова;

$Ko = \frac{R_0(u_0 - u_p)}{c'(t_c - \theta)}$  – критерий Коссовича;  $Nu' = \frac{AR^2}{c'\gamma'a}$  –

эмпирический критерий Нуссельта;  $Bi'_m = \frac{BR}{a_m}$  – эмпири-

ческий массообменный критерий Био;  $a$  – коэффициент

температурыпроводности, м<sup>2</sup>/с

При преобразовании системы уравнений (7) – (11) к безразмерному виду использовалась связь средней скорости сушки с поверхностным влагосодержанием

$$\Delta \bar{u} = \frac{2}{R^2} \int_0^R r \Delta u dr = \frac{2}{R^2} \cdot \left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{r=R} \equiv \frac{2}{R} \cdot \frac{\partial u}{\partial R}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \tau} + w \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = - \frac{2B}{R} (u_R - u_p), \quad (13)$$

где  $\Delta$  – оператор Лапласа.

Расчетные зависимости при математическом описании в подвижной системе относятся к стационарному процессу, когда параметры монодисперсного слоя зависят только от одного аргумента – пространственной координаты  $x$  [1-3].

При стационарном процессе в сушильном аппарате, когда равны нулю частные производные по времени искомым переменных вследствие подвижности системы, некоторые пространственные переменные играют роль времени и процесс носит нестационарный характер [3, 4].

Поэтому для стационарного режима сушки параметры частицы и сушильного агента в каждом сечении рабочего объема сушилки остаются постоянными, а производные основных переменных состояния по времени принимаются равными нулю:

$$\frac{\partial U}{\partial Fo} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial Fo} = 0$$

Стационарное состояние объекта сушки определяется следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial U}{\partial X} = Lu \left( \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} + \frac{1}{Z} \frac{\partial U}{\partial Z} \right) \quad (14)$$

$$\frac{\partial T}{\partial X} = -Nu' T + Ko Bi'_m U_R \quad (15)$$

с граничным условием (9), начальными условиями (10) и условиями сопряжения (11). Таким образом,

получена система уравнений (7) – (15) в безразмерном виде, описывающая процесс сушки единичной частицы при прямоточно-противоточном продувании агентом сушки с линейной скоростью  $v$  гравитационно-движущийся монослоем высушиваемого материала со скоростью  $w$  (рис. 1).

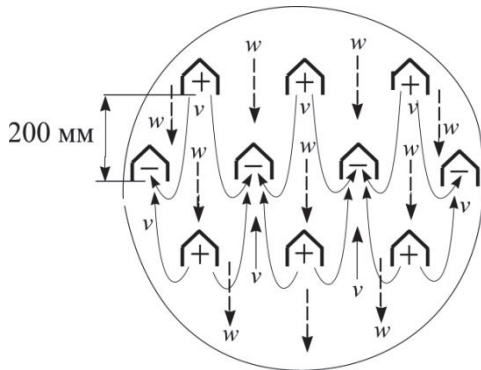


Рис. 1. Движение сушильного агента со скоростью  $w$  и дисперсного материала со скоростью  $v$  при рядной схеме расположения подводящих и отводящих коробов шахтной сушилки

Данная система уравнений является упрощенной (не учитываются температурные градиенты, термодиффузия, распределенность источника теплоты в самой частице), но она достаточно сложна для аналитического исследования (в силу нелинейности) и может быть решена лишь приближенными вычислительными методами.

Однако при этом моделирование сушки может осуществляться на основе теплофизических характеристик частиц высушиваемого материала, определяемых экспериментально [3, 4].

Для решения системы уравнений использован метод прямых [5], в соответствии с которым радиус частицы делится на  $n$  частей, а конечно-разностные соотношения для  $k$ -ой прямой имеют вид:

$$\frac{\partial U}{\partial Z} = \frac{U_{k+1} - U_{k-1}}{2h}, \quad \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} = \frac{U_{k+1} - 2U_k + U_{k-1}}{h^2}, \quad (16)$$

где  $n$  – количество прямых;  $k$  – номер прямой;  $h$  – интервал по радиусу высушиваемого продукта,  $h = R/n$ ;

$$(\Delta U)_k = \left( \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} + \frac{1}{Z} \frac{\partial U}{\partial Z} \right)_k = \frac{U_{k+1} - 2U_k + U_{k-1}}{h^2} - \frac{1}{Z_k} \cdot \frac{U_{k+1} - U_{k-1}}{2h}, \quad (17)$$

где  $k = 1, 2, \dots, n-1$ .

Принимая  $Z_k = kh$ , выражение (17) можно записать в виде

$$(\Delta U)_k = \frac{n^2(2k+1)}{2R^2 k} U_{k+1} - \frac{2n^2}{R^2} U_k + \frac{n^2(2k-1)}{2R^2 k} U_{k-1} \quad (18)$$

Для прямой с номером  $n$  – на границе имеем

$$(\Delta U)_n = \left( \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} + \frac{1}{Z} \frac{\partial U}{\partial Z} \right)_n \quad (19)$$

Представим  $U_{n-1}$  в виде ряда Тейлора в точке  $n$

$$U_{n-1} = U_n - h \frac{\partial U_n}{\partial Z} + h^2 \frac{\partial^2 U_n}{\partial Z^2} - \dots \quad (20)$$

Ограничиваясь тремя членами ряда (20), находим частную производную

$$\frac{\partial^2 U_n}{\partial Z^2} = \frac{1}{h} \left( \frac{\partial U_n}{\partial Z} - \frac{U_n - U_{n-1}}{h} \right). \quad (21)$$

Таким образом, получаем

$$(\Delta U)_n = \frac{1}{h} \left( \frac{\partial U_n}{\partial Z} - \frac{U_n - U_{n-1}}{h} \right) + \frac{1}{Z_n} \cdot \frac{\partial U_n}{\partial Z} \quad (22)$$

Используя выражения (18) и (22), и учитывая граничное условие (9)

$$\frac{\partial U_n}{\partial Z} = \frac{\partial U}{\partial Z} \Big|_{Z=R} = -Bi'_m U_R$$

и условие сопряжения (11)

$$U_n - U_n = 0$$

система дифференциальных уравнений в частных производных (7) – (8) приводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{dU_1}{dX} = Lu \left( \frac{3n^2}{2R^2} U_{k+1} - \frac{3n^2}{2R^2} U_k \right),$$

$$\frac{dU_k}{dX} = Lu \left( \frac{n^2(2k+1)}{2R^2 k} U_{k+1} - \frac{2n^2}{R^2} U_k + \frac{n^2(2k-1)}{2R^2 k} U_{k-1} \right),$$

$$k = 2, \dots, n-1; \quad (23)$$

$$\frac{dU_n}{dX} = Lu \left( 2n^2 (U_{n-1} - U_n) - (2n-1)Bi'_m U_n \right), \quad (24)$$

$$\frac{\partial T}{\partial X} = -Nu' T + Ko Bi'_m U_n \quad (25)$$

с начальными условиями

$$U_i|_{=1}, i = 1, 2, \dots, n; \quad T|_{=1}. \quad (26)$$

Полученная система дифференциальных уравнений (16) – (26) решена методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности [5]. Для решения задачи (16) – (26) разработан программный модуль расчета процесса сушки в шахтной прямоточной зерносушилке на языке *MachCAD*.

Предлагаемый метод моделирования реализован на примере процесса сушки семян льна масличного, который является наиболее энергоемким в технологии его переработки. Получаемое техническое льняное масло нашло широкое применение в химической промышленности для производства олифы, лакокрасочных покрытий, биодизельного топлива. На его основе и с его использованием создаются десятки материалов, в первую очередь, полимеры, начиная с электроизоляции и заканчивая линолеумом [6-8].

Исследование кинетики сушки семян льна

проводились на экспериментальной установке [9], в которой моделировалось противоточно-прямоточное продувание дисперсного слоя путем изменения направления агента сушки.

Эмитировался процесс сушки в шахтной сушилке: дисперсный слой зерна не перемещался, а изменялось направление потока сушильного агента, что в реальных условиях соответствует его подаче через подводящие короба и отводу через отводящие короба (рис. 2).

В качестве сушильного агента использовалась паровоздушная смесь, подготовленная в испарителе теплового насоса, с пониженным влагосодержанием  $x = 0,002$  кг/кг и высокой влагопоглощающей способностью [10].

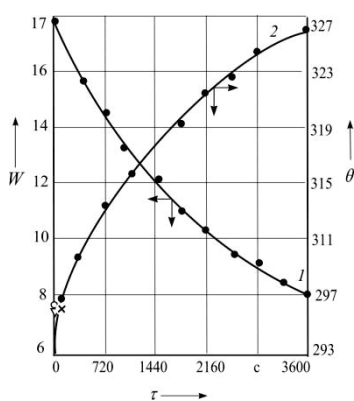


Рис. 2. Экспериментальные кривые сушки и нагрева семян льна масличного:  $t_c = 363$  К;  $v = 1,2$  м/с;  $w = 0,015$  м/с

Проверка на адекватность математической модели (24) – (25) проводилась путем минимизации суммы квадратов отклонений расчетных и экспериментальных значений влажности и температур дисперсного слоя в местах отбора проб для всех режимов. Идентифицируемыми параметрами являлись эмпирические коэффициенты теплообмена  $A$  и массообмена  $B$ .

Численный эксперимент позволил найти значения  $A = 0,331$  кДж/(м<sup>3</sup>·К·с) и  $B = 4,07 \cdot 10^7$  м/с, которые обеспечили наилучшую сходимость расчетных и экспериментальных данных. Их отклонение по абсолютному значению не превышало 12,5 %.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, применение теоретических методов кинетического расчета в сочетании с упрощающими допущениями, а также использование эмпирических коэффициентов тепло- и массообмена стационарного режима сушки, при котором параметры частицы цилиндрической формы и сушильного агента в каждом сечении дисперсного слоя остаются постоянными и зависят только от пространственной координаты позволяют с

достаточной степенью точности проводить инженерные расчеты процесса сушки. На примере процесса сушки семян льна масличного при прямоточно-противоточном продувании агента сушки через гравитационно-движущийся монослой дисперсного материала показаны возможности предлагаемого подхода.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Рудобашта С.П. Кинетический расчет процесса конвективной сушки дисперсных материалов / С.П. Рудобашта // Теплообмен в процессах сушки: труды Минского международного форума по теплообмену, 22–26 мая 2000 г. – Минск, 2000. – Т. 9. – С. 41–48.
2. Рудобашта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С.П. Рудобашта. – М.: Химия, 1980. – 248 с.
3. Рудобашта С.П. Кинетический расчет сушилок / С.П. Рудобашта // Вестник Московского государственного агроинженерного университета имени В.П. Горячкина. – 2010. – № 2. – С. 55 - 59.
4. Лыков А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
5. Волков Е. А. Численные методы / Е.А. Волков. – М.: Изд-во «Лань», 2008. – 256 с.
6. Гусева Д.А. Сравнительный анализ льняного масла трех вариантов холодного отжима / Д.А. Гусева, А.В. Широин, М.А. Санжаков, Н.Н. Прозоровская // Масложировая промышленность. – 2011. – №6. – С. 30-32.
7. Пат. 2693046 С1, МПК С11С 3/04, С11С 3/10, С10L 1/02, С07С 67/03. Способ управления процессом переработки масличных семян в биодизельное топливо / Шевцов А.А., Ткач В.В., Тертычная Т.Н., Сердюкова Н.А. – заявитель и патентообладатель А.А. Шевцов, В.В. Ткач, Т.Н. Тертычная, Н.А. Сердюкова. - № 2018126879; заявл. 20.07.2018; опубл. 31.05.2019. Бюл. № 19.
8. Шевцов А.А. Управление теплонасосной технологией переработки масличных культур в биодизельное топливо / А.А. Шевцов, Т.Н. Тертычная, В.В. Ткач, Н.А. Сердюкова // Химическая промышленность. – 2020. – № 2. – С. 102-108.
9. Тертычная Т.Н. Экспериментально-статистическое исследование процесса сушки зерна тритикале при противоточно-прямоточном продувании зернового слоя / Т.Н. Тертычная, А.А. Шевцов, С.С. Куликов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2020. – Т. 81. – № 4. – С. 27–31.
10. Шевцов А.А. Численно-аналитическое решение задачи Стефана при моделировании процесса осушения паровоздушной смеси в испарителе-охладителе теплового насоса / А.А. Шевцов, Л.И. Лыткина, Т.Н. Тертычная, С.С. Куликов // Южно-Сибирский научный вестник. – 2020. – № 5. – С. 41-46.

*Шевцов Александр Анатольевич – д.т.н., профессор, кафедра общепрофессиональных дисциплин, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, РФ; внешний совместитель кафедры технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, г. Воронеж, РФ, тел. 8-920-213-11-36, e-mail: shevalol@rambler.ru.*

*Татьяна Николаевна Тертычная – д.с.х.н., профессор, кафедра технологии хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, г. Воронеж, РФ; тел. 8-910-348-06-63 e-mail: tertychnaya777@yandex.ru*

*Куликов Сергей Сергеевич курсовой офицер-преподаватель, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, РФ; тел. 8-951-548-46-97, e-mail: sergeifonkulikov@gmail.com*

# MODELING OF CONVECTIVE DRYING PROCESS DISPERSE MATERIAL IN GRAVITY-MOVING MONOLAYER AT MICROKINETIC LEVEL

A.A. Shevtsov<sup>1,2</sup>, T.N. Tertychnaya<sup>3</sup>, S.S. Kulikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Voronezhsky State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>Military training and research center Of the air force «Air force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin», Voronezh, Russia,

<sup>3</sup>Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

The nonlinearity of the differential equations of thermal mass transfer of A.V. Lykov and the difficulty in experimentally determining the unknown coefficients included in them do not allow us to obtain an analytical solution, which is due to the dependence of transfer coefficients on the temperature and moisture content of material. Known analytical solutions are obtained only for canonical bodies (plate, cylinder, ball). However, these solutions are cumbersome and complex in structure, which hinders their practical application. To build a mathematical model of the convective drying process, simplifying assumptions are formulated in the work: the shape of the particle was considered in the form of an unlimited cylinder; neglected axial WLA, thermodiffusion, thermal conductivity of an individual particle. The use of theoretical methods of microkinetics of continuous drying of dispersed materials, based on the description of the kinetics of drying of single particles, formulated simplifications, initial and boundary conditions, made it possible to obtain a system of differential equations in dimensionless form, describing the process of drying of a single particle during direct-flow countercurrent blowing of a drying agent through a gravitational-moving monolayer of a high-saturated material. This system of equations is simplified (temperature gradients, thermodiffusion, distribution of the heat source in the particle itself are not taken into account) and solved by the Runge-Kutt method of the fourth order of accuracy. A graphical interpretation of the simulation results is given on the example of drying of flax seeds, which has been widely used in the production of technical oil. The mode error does not exceed 12.5 %.

*Keywords: simulation, microkinetics, drying, disperse material.*

## REFERENCES

1. Rudobashta S.P. Kinetic calculation of the process of convective drying of dispersed materials / S.P. Rudobashta // Heat and mass exchange in drying processes: works of the Minsk International Forum on Heat and Mass Exchange, May 22-26, 2000 – Minsk, 2000. – Vol. 9. – pp. 41-48.
2. Rudobashta S.P. Massoperenos in solid phase systems/S.P. Rudobashta. – M.: Chemistry, 1980. – 248 p.
3. Rudobashta S.P. Kinetic calculation of dryers / S.P. Rudobashta // Bulletin of the Moscow State Agricultural Engineering University named after V.P. Goryachkin. – 2010. – № 2. – pp. 55-59.
4. Lykov A.V. Drying Theory/A.V. Lykov. – 2nd edition, revised and supplemented. – M.: Energy, 1968. – 472 p.
5. Volkov E. A. Numerical methods / E.A. Volkov. - M.: Publishing house «Lan», 2008. – 256 p.
6. Guseva D.A. Comparative analysis of linseed oil of three cold squeezing variants / D.A. Guseva, A.V. Shironin, M.A. Sanzhakov, N.N. Prozorovskaya // Creamy-fat industry. – 2011. – №6. – pp. 30-32.
7. Patent №. 2410884 S2 of the Russian Federation, MPK A 23 B 9/24, C 11 B 1/06. Method of drying oil seeds with introduction of stable mash and installation for its implementation / A.A. Shevtsov, A.V. Drannikov, D.A. Britikov, L.N. Frolova, A.V. Kalinina; applicant and patent holder of the Voronezh State Technological Academy - № 200911978813/13; declared 25.05.2009; published by 10.02.2011; Bulletin № 4.
8. Shevtsov A.A. Management of heat pump technology for the processing of oilseeds into traditiesel fuel/A.A. Shevtsov, T.N. Tertychnaya, V.V. Tkach, N.A. Serdyukova//Chemical industry. – 2020. – № 2. – pp. 102-108.
9. Tertychnaya T.N. Experimental and statistical study of the process of drying triticale grain during counter-current direct-flow blowing of the grain layer / T.N. Tertychnaya, A.A. Shevtsov, S.S. Kulikov // Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies. – 2020. – T. 81. – № 4. – pp. 27-31.
10. Shevtsov A.A. Numerical and analytical solution of the Stefan problem when modeling the process of drying the steam-air mixture in the evaporator-cooler of the heat pump / A.A. Shevtsov, L.I. Lytkina, T.N. Tertychnaya, S.S. Kulikov // South Siberian Scientific Bulletin. – 2020. – № 5. – pp. 41-46.

*Shevtsov Alexander Anatolyevich – Doctor of Technology, Professor, Department of General Professional Disciplines, Military Training and Research Center Air force «The Air Force Academy named after the professor N.E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin», Voronezh, Russian Federation; external part-time employee of the Department of Fats Technology, Processes and Apparatus for Chemical and Food Production, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russian Federation; tel. 8-920-213-11-36, e-mail: shevalol@rambler.ru.,*

*Tatyana Nikolaevna Tertychnaya – Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Department of Technology of Storage and Processing of Agricultural Products, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russian Federation; tel. 8-910-348-06-63, e-mail: tertychnaya777@yandex.ru.*

*Sergey Sergeevich Kulikov – course officer-teacher, Military educational scientific center of the Air Force «Military and air academy of a name of professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin», Voronezh, Russian Federation; tel. 8-951-548-46-97, e-mail: sergeifonkulikov@gmail.com.*