

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПОДГОТОВКИ МАСЛИЧНОГО СЫРЬЯ В МНОГОЧАННОЙ ЖАРОВНЕ

*Владимир Дидур<sup>1</sup>, Валентин Ткаченко<sup>1</sup>, Александр Ткаченко<sup>1</sup>, Владимир Дидур<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Таврический государственный агротехнологический университет*

*Пр. Б. Хмельницкого, 18, Мелитополь, Украина. E-mail: didurva@mail.ru*

*<sup>2</sup>Уманский национальный университет садоводства*

*Умань, Украина. E-mail: didur-vladimir@yandex.ru*

*Vladimir Didur<sup>1</sup>, Valentin Tkachenko<sup>1</sup>, Aleksandr Tkachenko<sup>1</sup>, Vladimir Didur<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Tavria State Agrotechnological University,*

*B. Khmelnytsky Avenue, 18, Melitopol, Ukraine. E-mail: didurva@mail.ru*

*<sup>2</sup>Umansky national university of horticulture*

*Uman, Ukraine E-mail: didur-vladimir@yandex.ru*

**Аннотация.** Работа посвящена изучению процессов тепло- и влагопереноса в многочанной жаровне при тепловой обработке мятки, с целью вызвать определённые физико-химические изменения мятки и структуры её частей, которые способствуют наилучшему эффекту при извлечении масла. Рассмотрено сложное движение мятки в чане жаровни, представляющей собой турбинную мешалку с наклонными лопатками. Благодаря расположению мешалки наряду с основным движением образуется вторичный поток. Анализом доказано, что в многочанной жаровне обрабатываемый материал и среда находятся в прямооточном движении и требуют разработки граничных условий, обеспечивающих описание этого движения существующими дифференциальными уравнениями.

Приводится система дифференциальных уравнений, которая может явиться моделью внутреннего тепло- и массообмена при влаготепловой обработке мятки в чане. В качестве одного граничного условия используется условие симметрии. Для определения вторых граничных условий составляются балансовые уравнения для потоков, определяются переменные значения потенциалов, от которых зависит скорость процесса.

В работе представлены граничные условия для процесса увлажнения на границе влажный материал – среда: поток влаги перемещается с теплоносителя к поверхности материала и потоками влаги поверхностных слоёв материала за счёт диффузии и термодиффузии к внутренним слоям. На основе потоков влаги составлены балансовые уравнения увлажнения для прямооточного движения материала и теплоносителя. Приводится плотность тепла создаваемого глухим паром днища чана. Составлено уравнение теплового баланса для первого этапа жаренья.

Оба этапа жаренья сопровождаются контактным (кондуктивным) нагревом мятки от конденсации глухого пара через днище. Причём, на первом этапе это сопровождается пропариванием мятки, а на втором сушкой без введения дополнительного теплоносителя.

У горячей поверхности чана образуется подвижный контактный слой. Приводится основное урав-

нение тепло- и влагообмена для контактной сушки на греющей поверхности днища чана.

**Ключевые слова:** тепло- влагоперенос, многочанная жаровня, материальный баланс, тепловой баланс, плотность потока массы, плотность потока тепла.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В многочанной жаровне производится сложный технологический процесс влаготепловой обработки мятки, цель которого вызвать определённые физико-химические изменения мятки и изменения структуры её частей, которые способствуют наилучшему эффекту при извлечении масла.

Теплофизическими основами кондиционирования по влажности и температуре являются закономерности массо- (влаго-) и теплопереноса. А.В. Лыков применил к переносу вещества методы и систему понятий, которые применяются в явлениях переноса тепла, и тем самым заложил основы общей термодинамики переноса, которая рассматривает эти явления в их неразрывной связи, т.е. так как они протекают в действительности. Разработана теория тепло- и массопереноса на базе решения системы нелинейных дифференциальных уравнений при граничных условиях, соответственных постоянным и переменным потенциалам в среде, меняющимся по наперёд заданным законам. Однако теория предназначена для материала и среды, находящихся в неподвижном состоянии [1-3].

Таким образом, проблемой для создания математической модели тепло- и массоперенос в многочанной жаровне является, прежде всего, детальное изучение и математическое описание реального процесса и построение граничных условий, позволяющих получить характеристики, оценивающие движение материала и тепло- влагоносителя, которые находятся в различных количественных соотношениях.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В работе [4] впервые получена математическая модель влаготепловой обработки мятки в многочанной жаровне с использованием системы

дифференциальных уравнений переноса массы и энергии. Математическая модель влаготепловой обработки в толстом неподвижном слое паровой жаровни принята как сумма тонких элементарных слоёв. Толстый неподвижный слой условно разбит на элементарные слои, а время влаготепловой обработки на малые промежутки времени. Для каждого элементарного слоя в малом промежутке времени в пределах данного интервала потенциалов принимаются постоянные коэффициенты тепло- и массопереноса и термодинамические характеристики. Но с переходом из слоя в слой и изменением времени коэффициенты тепло и массопереноса и термодинамические характеристики меняются дискретно. Система дифференциальных уравнений должна замыкаться экспериментальными зависимостями технологических свойств перерабатываемой массы и зависимостями, определяющими параметры агента сушки.

Технологический процесс влаготепловой обработки мятки по процессам тепло и массопереноса ближе всего процессам сушки. При исследовании сушки семян подсолнечника в толстом неподвижном слое [5], прежде всего, были определены теплофизические и термодинамические свойства составляющих семян подсолнечника, составлены соответствующие уравнения регрессии этих характеристик. Для описания внутреннего теплообмена в оболочке и в ядре семечки применили систему дифференциальных уравнений переноса массы и энергии, разработанную А.В. Лыковым на основании термодинамики необратимых процессов. Анализ и практика решений системы уравнений с частными производными показывает, что использование классических методов не позволяет эффективно решать задачи до конца. Применение методов интегральных преобразований позволяет преодолеть эти трудности. Решение модели неограниченной пластины и шара получены методом интегральных преобразований.

В работе [6] предложена безотходная технология переработки семян клещевины по схеме двухступенчатого отжима и химической детоксикации клещевинного жмыха. Отказ от экстракции масла позволяет применить технологию в малотоннажном производстве, а отделение лузги, химическая детоксикация жмыха даёт возможность получить не только качественное масло, но и высокобелковые кормовые добавки. Отделяемая лузга используется для технологического производства. Приведены технологические режимы влаготепловой обработки мятки семян клещевины в многочанной жаровне.

Исследования [7-9,30, 31] показали перспективность, безопасность, технологичность процесса, энергоэкономия, получения продуктов высокого качества при применении гидродинамических режимов в аппаратах с закрученными потоками теплоносителя. Частицы постоянно взаимодействуют друг с другом и со стенкой сушилки, при этом увеличивается скорость взаимодействующих фаз, повышается концентрация твёрдой фазы, время пребывания материала в аппарате тоже увеличивается [7, 10-13]. Идёт увеличение коэффициентов тепло-

массообмена, так как увеличивается скорость движения фаз в потоке почти в четыре раза, если сравнить с прямолинейными потоками. Всё это способствует повышению эффективности сушки.

Профессор А. Н. Остриков [14] исследовал сушку и тепловую обработку пищевого растительного сырья. Он сформулировал и экспериментально подтвердил модель процесса сушки круп перегретым паром.

Научный интерес представляют математические модели для осуществления сушки во взвешенном слое [8, 9, 15].

Большое значение имеют кинетические модели, позволяющие описать процесс сушки пищевых продуктов при различных методах энергоподвода [16-20].

## ПОСТАНОВА ЗАДАЧИ

Задачей статьи является установление закономерностей происходящих при влаготепловой обработке мятки в многочанной жаровне и разработка математической модели для их описания.

## ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

В работе [4] при описании математической модели влаготепловой обработки мятки в многочанной жаровне рассматривался толстый неподвижный слой обрабатываемого материала. Для этого случая использовали систему дифференциальных уравнений переноса энергии и массы, предназначенной для материала и среды, находящихся в неподвижном состоянии.

На самом деле каждый чан жаровни представляет собой турбинную мешалку с наклонными плоскими лопатками. Результирующую скорость  $w$  мятки в любой точке чана можно разделить в цилиндрической системе координат  $(r, \varphi, z)$  на три составляющих: радиальную составляющую  $w_r$ , осевую составляющую  $w_z$  и тангенциальную составляющую  $w_t$ , рис. 1 [21].

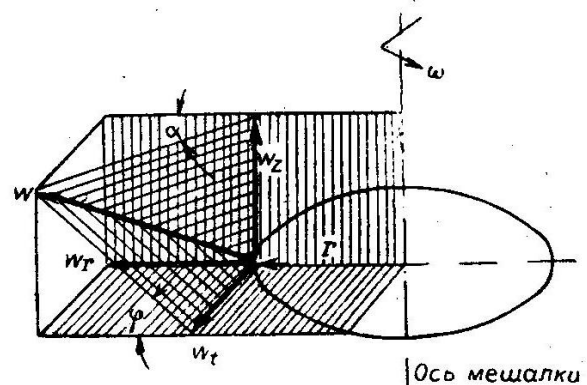


Рис. 1. Схема разложения суммарной скорости мезги в чане жаровни с мешалкой на составляющие скорости

Fig. 1. The scheme of decomposition of total speed of a material in a tub to a brazier with a mixer for making speeds

Отдельные составляющие скорости можно рассчитать по зависимостям.

– радиальная составляющая:

$$w_r = \frac{w}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \varphi}},$$

– тангенциальная составляющая:

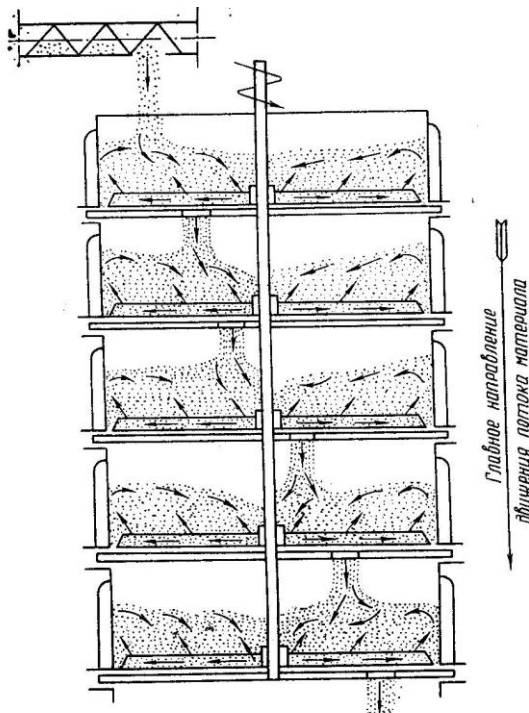
$$w_t = \frac{w \operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \varphi}},$$

– осевая составляющая:

$$w_z = \frac{w \operatorname{tg} \varphi}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \varphi}},$$

где:  $\alpha$  – угол, определяющий отклонение результирующей скорости от вертикальной плоскости, проходящей через ось аппарата и начало этого вектора;  $\varphi$  – угол, определяющий отклонение вектора, результирующей скорости от горизонтальной плоскости, перпендикулярной к оси аппарата (плоскость вращения мешалки).

Так как мешалка находится у самого дна жаровни, то при работе образуется один поток вторичной циркуляции. В первый период жаренья для увлажнения и нагрева в мятку впрыскивают смесь пара и воды. На рисунке 2 [22] показана схема движения частиц мятки в жаровне при поточно-непрерывном жаренье.



**Рис. 2.** Движение частиц мятки в жаровне при поточно-непрерывном жаренье

**Fig. 2.** Schematic picture of movement of particles of a material in a brazier at exact-continuous process

Внутренний тепло- и массообмен, происходящий при влаготепловой обработке мятки в чане можно количественно описать с помощью системы дифференциальных уравнений тепло- и массопере-

носа, предложенной А.В. Лыковым, которая при отсутствии градиента общего давления представляется в таком виде [1, 2]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a_T \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{\Gamma}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\varepsilon r_c}{c} \frac{\partial U}{\partial \tau}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \left( \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{\Gamma}{r} \frac{\partial U}{\partial r} \right) + a_m \delta \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{\Gamma}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right). \quad (2)$$

где:  $t$  – текущая температура материала в данной точке, К;  $\tau$  – время, с;  $r$  – текущий линейный размер материала, м;  $\Gamma$  – фактор формы (для неограниченной пластины  $\Gamma = 0$ , для неограниченного цилиндра  $\Gamma = 1$ , для шара  $\Gamma = 2$ );  $\varepsilon$  – критерий фазового перехода;  $r_c$  – скрытая теплота испарения, Дж/кг;  $U$  – текущее влагосодержание материала в данной точке, кг/кг сухого материала;  $a_m$  – коэффициент диффузии влаги, м<sup>2</sup>/с;  $\delta$  – коэффициент термовлагопроводности, 1/К;  $a_T$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $a_T = \lambda / c \rho_0$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $c$  – теплоёмкость материала, Дж/(кг·К);  $\rho_0$  – плотность абсолютно сухого тела, кг/м<sup>3</sup> [23].

Система уравнений (1, 2) определяет нестационарные поля температур и концентраций во влажном материале в зависимости от состояния на границах. В качестве одного граничного условия используем условие симметрии:

$$\left( \frac{\partial U}{\partial r} \right)_{r=0} = \left( \frac{\partial t}{\partial r} \right)_{r=0} = 0. \quad (3)$$

Необходимость применения системы дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса и использование массообменных характеристик были предприняты и нами [4, 6, 24], однако в работе [6] использовались общепринятые граничные условия.

Для определения вторых граничных условий, позволяющих получить характеристики, оценивающие движение материала и теплоносителя, которые находятся в различных количественных соотношениях, воспользуемся методикой предложенной З.Ю. Мазяк [25]. При влаготепловой обработке мятки в паровых жаровнях потенциалы тепло- и массопереноса претерпевают значительное изменение, которые определяются ходом само процесса. Поэтому при составлении математической модели более целесообразно не задаваться законом изменения потенциалов в среде, а пользоваться балансовыми уравнениями, непосредственно отражающими изменения потенциалов. Это выполнено в последующих подразделах.

На первом этапе влажного типа жаренья наряду с контактным нагревом в чанах жаровен большое количество тепла передаётся непосредственно острым увлажнённым паром.

Граничные условия для процесса увлажнения на границе влажный материал – среда представляются в виде балансовых уравнений [5].

Поток массы  $j$  в материале за счёт диффузии:

$$j = a_m \rho_0 \nabla U. \quad (4)$$

С учётом явлений термодиффузии:

$$j = a_m \rho_0 (\nabla U + \delta \nabla t). \quad (5)$$

При увлажнении поток массы  $j$  с теплоносителя (со среды) к поверхности материала представляется с помощью формулы Дальтона:

$$j = B(P_C - P_S), \quad (6)$$

где:  $B$  – коэффициент испарения, кг/(Н·с);  $P_S$  – упругость насыщенных паров при данной температуре, Н/м<sup>2</sup>;  $P_C$  – упругость паров в среде, Н/м<sup>2</sup>.

Плотность потока тепла, создаваемого глухим паром днища чанов, определяется из выражения:

$$q_q(\tau) = \frac{D(i-q)}{F}, \quad (7)$$

где:  $q_q(\tau)$  – плотность потока тепла, Вт/м<sup>2</sup>;  $D$  – расход глухого пара, кг/с;  $i$  – энтальпия греющего пара, Дж/кг;  $q$  – теплосодержание конденсата, Дж/кг;  $F$  – площадь днища чана жаровни, м<sup>2</sup>.

Первый этап увлажнения и быстрое нагревание мятки и пропаривания с доведением мятки до оптимальной для дальнейшей обработки начальной влажности.

Для прямооточного движения мятки в первом чане жаровни материальный баланс запишем:

$$G(W - W_1) = V(x_0 - x), \quad (8)$$

где:  $G$  – расход сухого жирного вещества мятки, сухого материала, кг/с;  $V$  – расход теплоносителя, кг сухого теплоносителя/с;  $W, W_0, W_1$  – текущее, начальное и полученное после внесения воды в мятку среднее по объёму влагосодержание материала, кг/кг сухого материала;  $x_0$  – влагосодержание теплоносителя на входе в зону, кг/кг сухого теплоносителя;  $x$  – текущее влагосодержание теплоносителя, кг/кг сухого теплоносителя,  $x = x_0 - \frac{1}{\alpha}(W - W_1)$ ;

$\alpha = \frac{V}{G}$  – удельный расход теплоносителя.

Влагосодержание газовой среды равно [26, 27]:

$$x = A \frac{\varphi_T P_S}{P - \varphi_T P_S}, \quad (8)$$

где:  $A = R_{\Gamma} / R_{\Pi}$ ,  $R_{\Gamma}, R_{\Pi}$  – газовые константы (если теплоноситель воздух  $A = 0,622$ );  $P$  – общее давление, Н/м<sup>2</sup>, Па;  $\varphi_T$  – относительная влажность теплоносителя,  $\varphi_T = P_C / P_S$ .

На основании уравнений (9) и (10) для прямооточного движения получаем:

$$\varphi_T P_S = \frac{\Pi \left( x_0 + \frac{W - W_1}{\alpha} \right)}{A + x_0 + \frac{W - W_1}{\alpha}}. \quad (11)$$

Уравнение (11) является нелинейным. Однако его можно представить с незначительной потерей точности как линейное:

$$\varphi_T P_S = \frac{\Pi \left( x_0 + \frac{W - W_1}{\alpha} \right)}{A}. \quad (12)$$

$$A \square \frac{W - W_1}{\alpha} + x_0. \quad (13)$$

Балансовое уравнение на границе по потоку влаги на основании (4) и (12) для прямооточного движения представим:

$$a_m \rho_0 \left( \frac{\partial U}{\partial r} \right)_{\Pi} = B P_C \left[ 1 - \frac{A P_S \alpha}{\Pi (\alpha x_0 + W - W_1)} \right], \quad (14)$$

где:  $\Pi$  – индекс обозначает поверхность.

Балансовое уравнение на границе по потоку влаги на основании уравнений (5), (12) для прямооточного движения с учётом термодиффузии представим:

$$a_m \rho_0 \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial r} \right)_{\Pi} + \delta \left( \frac{\partial t}{\partial r} \right)_{\Pi} \right] = B P_C \left[ 1 - \frac{A P_S \alpha}{\Pi (\alpha x_0 + W - W_1)} \right]. \quad (15)$$

Уравнения теплового баланса. Балансовые уравнения по тепловому потоку в общем виде можно представить так:

$$\begin{aligned} \alpha_T (t_T - t_{\Pi}) + \frac{D}{F} (i - q) = \\ = \lambda \left( \frac{dt}{dr} \right)_{\Pi} + (1 - \varepsilon) r_C j, \end{aligned} \quad (16)$$

где: температура теплоносителя  $t_T$  – величина переменная, которая изменяется в зависимости от того, сколько тепла расходует теплоноситель на нагрев материала и испарения влаги.

Количество тепла, которое оставляет теплоноситель и глухой пар днища чана в жаровне при прямооточном движении:

$$\begin{aligned} V c_T (t_{Т.Н} - t_T) + \frac{D}{F} (i - q) = \\ = (1 + Rb) r_C G \Delta W \end{aligned}, \quad (17)$$

или:

$$t_T = t_{Т.Н} + \frac{D}{F V c_T} (i - q) - \frac{(1 + Rb) r_C \Delta W}{\alpha c_T}, \quad (18)$$

где:  $\alpha_T$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $t_T$  – текущая температура теплоносителя, град;  $t_{Т.Н}$  – начальная температура на входе в зону;  $t_{Т.К}$  – конечная температура теплоносителя на выходе из зоны;  $c_T$  – теплоёмкость теплоносителя, Дж/(кг·К);  $D$  – расход глухого пара, кг/с;  $i$  – энтальпия греющего пара, Дж/кг;  $q$  – теплосодержание конденсата, Дж/кг;  $r_C$  – скрытая теплота испарения, Дж/кг.

Балансовое уравнение по тепловому потоку на границе для прямооточного движения определяется из уравнений (6), (9), (12), (16), (18):

$$\alpha_T \left[ t_{Т.Н} - \frac{(1+Rb)r_c(W-W_1)}{\alpha c_T} + \frac{D}{Vc_T}(i-q) - t_{П} \right] = \quad (19)$$

$$= \lambda \left( \frac{\partial t}{\partial r} \right)_{П} + (1-\varepsilon)r_c B P_c \left[ 1 - \frac{A P_s \alpha}{\Pi(\alpha x_o + W - W_1)} \right];$$

Оба этапа жаренья сопровождаются контактным (кондуктивным) нагревом мятки от конденсации глухого пара через днища. Причём, на первом этапе это сопровождается пропариванием мятки, а на втором сушкой без введения дополнительного теплоносителя.

У горячей поверхности днища чана образуется подвижный контактный слой. Поле температур любого слоя мятки в направлении от контактного слоя непрерывно убывает. Распределение влагосодержания в процессе сушки неравномерно и несимметрично: в контактном слое, прилегающем к горячей поверхности, минимально и увеличивается в направлении от горячей поверхности. Перепад влагосодержания внутри контактного слоя создаётся за счёт парообразования, которое происходит с различной интенсивностью в зависимости от координаты слоя.

Основное уравнение тепло и влагообмена для контактной сушки на греющей поверхности имеет вид [28]:

$$\lambda_3 (\nabla t)_{гр} + c_{p0} R_V \frac{dt}{dt} + rj + \alpha_Q (t_{П} - t_c) = 0, \quad (20)$$

где:  $\lambda_3$  – эквивалентный коэффициент теплопроводности, учитывающий и перенос тепла паром, Вт/(м·К);  $\nabla t_{гр}$  – температурный градиент внутри материала на границе соприкосновения с нагретой поверхностью, К/м;  $\nabla$  – оператор Гамильтона;  $R_V$  – отношение объёма тела к его поверхности;  $\rho_0$  – плотность сухого тела;  $g$  – удельная теплота испарения, Дж/кг;  $j$  – плотность потока влаги, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $\alpha_Q$  – коэффициент теплообмена (теплоотдачи), Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $R_V$  – отношение объёма тела к его поверхности, м. Индекс «п» обозначает поверхность материала, а «с» – окружающую среду.

Из за большой общей толщины обрабатываемого слоя мятки процесс тепло- и массообмена происходит следующим образом. Влага, испарившаяся за счёт нагрева мятки контактным способом, отдаёт своё тепло вышерасположенным и более холодным слоям мятки, частично конденсируясь на них; это составляет один из важных моментов механизма жарения в чанных жаровнях (самопропаривание).

Полученные результаты позволяют составить дифференциальные уравнения тепло- и влагопереноса (1) и (2) при соответствующим образом выбранных краевых условиях (3), (14), (15), (19) и получить математические модели кондуктивного и конвективного тепло- и массопереноса в многочанной жаровне для конкретных семян масличной культуры с выбранной технологией переработки. Для численного решения полученной системы целесообразно произвести замену производных их конечными разностями. При решении системы уравнений тепло- и массопереноса возможно использовать нея-

вную схему и метод прогонки, которые в ряде случаев предпочтительнее [28, 29].

## ВЫВОДЫ

1. Разработаны математические модели процессов предварительной подготовки различного масличного сырья в многочанной жаровне с учетом граничных условий, позволяющих получить характеристики, оценивающие движение материала и теплоносителя, которые находятся в различных количественных соотношениях, а также с учетом плотности потока тепла, создаваемого глухим паром через днища чанов жаровни.

2. Установлены граничные условия из материальных и тепловых балансовых уравнений позволяют решить численным способом дифференциальные уравнения тепло- и влагопереноса и получить характеристики, оценивающие движение материала и тепло- влагоносителя, которые находятся в различных количественных соотношениях. Это в конечном итоге позволит повысить эффективность производства и качества продукции.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Лыков А.В., Михайлов Ю.А. 1959.** Теория переноса энергии и вещества. – Минск: АН БССР, 330. (Белоруссия).
2. **Лыков А.В., Михайлов Ю.А. 1963.** Теория тепло- и массопереноса. – Москва - Ленинград: Госэнергоиздат, 535.
3. **Эккерд Э.Р., Дрейк Р.М. 1961.** Теория тепло- и массообмена. – Москва: Госэнергоиздат, 265.
4. **Ткаченко А.В., Дидур В.В., Ткаченко В.А., Дидур В.А. 2012.** Математическая модель влаготепловой обработки мятки масличных культур в многочанной жаровне. Работы Таврического государственного агротехнологического университета: научное издание. Вып. 12, Т1 – Мелитополь. 23–35. (Украина).
5. **Ткаченко А.В., Дидур В.А. 2014.** Оборудование и технология сушки семян подсолнечника высших репродукций / Lambert Academie Publishing, 165 (Германия).
6. **Дидур В.А., Ткаченко В.А. 2014.** Технология переработки семян клещевины на малотоннажных предприятиях. Вестник Украинского отделения международной академии аграрного просвещения. – Мелитополь: Копицентр «Документ сервис». 21 – 36. (Украина).
7. **Фролова Л.Н. 2016.** Развитие научно-практических основ ресурсосберегающих процессов комплексной переработки семян масличных культур (теория, техника и технология). Дис. канд. техн. наук: 05.18.12. – Воронеж, 370.
8. **Алексанян И.Ю., Титова Л.М., Нугманов А.Х. 2014.** Моделирование процесса сушки дискретного материала в кипящем слое. Техника и технология пищевых производств, №3. 96 – 102.

9. **Бырдин А.П., Сидоренко А.А., Сточней В.Г. 2011.** Кинетика теплообмена в кипящем слое стадии прогрева материала. Вестник Воронежского государственного технического университета. Т.7, №11. 122 – 125.
10. **Бырдин А.П., Надеев А.А., Сидоренко А.А. 2013.** Анализ одной модели процессов обмена в движущихся фазах дисперсной системы. Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, учёных. Т.1, №1. 68–71.
11. **Рудобашта С.П., Зуев Г.А., Дмитриев В.М., Зуев Н.А. 2014.** Массопроводность при сушке коллоидных капиллярно-пористых материалов. Известия высших учебных заведений. Серия химия и химическая технология. Т. 57, №1. 103–107.
12. **Станкевич Г.Н., Овсянников Л.К. 2014.** Технология комбинированной сушки мекосемянных культур. V Международный научно-технический симпозиум «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажная обработка материалов (СЭТТ – 2014)). Иван. гос. хим. технол. ун-т – Иваново 344–348.
13. **Шевцов А.А., Остриков А.Н. 2014.** Техника и технология сушки пищевого растительного сырья. Воронеж: Воронежский государственный агротехнологический университет, 289.
14. **Остриков А.Н., Василенко В.Н., Фролова Л.Н., Драган И.В. 2014.** Техника и технология хранения растительного сырья и продукции масложировых предприятий: учебное пособие ВГУИТ, 82.
15. **Шевцов А.А., Павлов И.О., Воронова Е.В., Бритиков Д.А. 2010.** Аналитическое решение математической модели связанного тепло-массопереноса при конвективной сушке зерна. Известия вузов. Пищевая технология. №4. 99–104.
16. **Бритиков Д.А. 2013.** Разработка ресурсосберегающих процессов сушки зерна злаковых и масличных культур с использованием тепло-насосных технологий. Дис. докт. тех. наук: 05.18.12. – Воронеж, 332.
17. **Подгорный С.А., Косачев В.С., Кошевой Е.П., Схаляхов А.А., 2014.** Влажно-температурные кинетические зависимости при сушке. Новые технологии №1. 43-47.
18. **Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сорокина Н.Н. 2011.** Математическая модель и метод расчета динамики непрерывной сушки. Материалы четвёртой международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажная обработка материалов) (СЭТТ)». – Москва, МГАУ. 89 – 100.
19. **Ольшанский А.И. 2014.** Исследование теплообмена в процессе сушки влажных материалов по экспериментальным данным влагообмена. Инженерно-физический журнал. Т. 87, №4. 887– 898.
20. **Подгорный С.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С., Схаляхов А.А. 2014.** Постановка задачи описания переноса тепла, массы и давления при сушке. Новые технологии. №3. 20–27.
21. **Стренк Ф. 1975.** Перемешивание и аппараты с мешалками. Польша, 1971. /Пер. с польск. под ред. Щупляка И.А. – Ленинград: Химия, 384.
22. **Голдовский А. В. 1960.** К вопросу об улучшении конструкции аппаратов для приготовления мезги в производстве растительных масел. Масло-жировая промышленность, №8. 3–11.
23. **Чертов А.Г., 1977.** Единицы физических величин. – Москва, Высш. Школа, 287.
24. **Гинзбург А.С.1973.** Основы теории и техники сушки пищевых продуктов – Москва: Пищевая промышленность, 528.
25. **Мазяк З.Ю. 1979** Тепло- и массоперенос в пористых телах при переменных потенциалах в среде. – Львов: Вища школа, Изд-во при Львовском ун-те, 120. (Украина).
26. **Касаткин А.Г. 1971.** Основные процессы и аппараты химической технологии. – Москва: Химия, 750.
27. **Плановский А.Н. , Муштаев В.И., Ульянов В.М. 1979.** Сушка дисперсных материалов в химической промышленности. – Москва: Химия, 288.
28. **Лыков А.В. 1968.** Теория сушки. – Москва: Энергия, 472.
29. **Демидович Б. П., Марон И.А., Шувалова Э.З. 1967.** Численные методы анализа. – Москва: Наука, 368.
30. **Кюрчев С.В., Колодий А.С. 2013.** Анализ существующих способов и средств для сепарации семян. MOTROL. Motorization and energetics in agriculture. Lublin-Rzeszow. Vol. 15. No 2. 197–205.
31. **Задосная Н. 2015.** Аспекты обоснования параметров и режимов работы пневмосепаратора масличного сырья подсолнечника. MOTROL. Motorization and energetics in agriculture. Lublin-Rzeszow. Vol. 17. No 9. 43–48.

#### MATHEMATICAL MODELS OF PROCESSES PREPARATION OF OILSEEDS IN THE BRAZIER

**Summary.** The work is devoted to the study of heat and moisture transfer processes in the brazier with heat-treated seeds, in order to produce certain physical and chemical changes in the seed and its parts of the structure that contribute to the best effect when removing the oil. Considered complex motion of seeds in brazier pan, which is a turbine impeller with oblique blades.

The location of the mixer along with the main flow of traffic form a secondary. The analysis proved that in the brazier material to be treated and the environment are in a continuous-flow motion and require the devel-

opment of boundary conditions, providing a description of the existing differential equations of motion.

The drive system of differential equations, which can be a model of internal and mass transfer with the moisture-heat treatment in the vat. As a boundary condition used symmetry condition. To determine the second boundary conditions are drawn up the balance equations for the flow variables are determined by the values of the potentials from which the process depends on the speed.

The paper presents the boundary conditions for the humidification process at the border of the wet material - environment: water flow moves from the coolant to the surface of matter and flow of moisture the surface layers of the material by diffusion and thermal diffusion to the inner layers. On the basis of the moisture flux copresented moisture balance equation for the continuous-flow movement of material and coolant.

We present the density of heat generated deaf steam tank bottom. Compiled by the heat balance equation for the first phase of roasting.

Both stages are accompanied by roasting pin (convective) heating Mint from condensation of steam through the bottom of the blind. Moreover, in the first step is followed by steaming the seeds, and the second dryer without introducing additional coolant.

In the hot surface of the tank is formed movable contact layer. The basic equation of heat and moisture for contact drying on the heating surface of the vat bottom.

**Key words:** heat - moisture carrying over, a multi-capacitor brazier, material balance, thermal balance, density of a stream of weight, density of a stream of heat.