

**МЕХАНІЗАЦІЯ, ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТА**  
**АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ**  
**ПРОЦЕСІВ В АПК**

УДК 631.362.23

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНДУКТИВНОГО  
И КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА  
В МНОГОЧАННОЙ ЖАРОВНЕ**

Дидур В.А., д.т.н., проф., акад. МААО

Ткаченко В.А., к.т.н., доц.

Ткаченко А.В., к.т.н.

*Таврический государственный агротехнологический университет*

г. Мелитополь, Украина

Тел. +380619440274

e-mail: didurva@mail.ru, tba34@mail.ru

Дидур В.В., к.т.н.

*Уманский национальный университет садоводства*

г. Умань, Украина

e-mail: didur-vladimir@yandex.ru

**Аннотация.** Детально описаны реальные процессы, происходящие при влаготепловой обработке мятки в многочанной жаровне. Впервые предложены уравнения тепло- и влагообмена в подвижном контактном слое у горячей поверхности днища чана, обогреваемого тепловым потоком от конденсации глухого пара. При жаренье в многочанной жаровне время контакта мезги с поверхностью обогреваемого днища чана предлагается определять по частоте вращения мешалки (ножей). И при анализе варьировать не частотой вращения мешалки, а временем контакта. При жаренье контактная сушка и нагрев состоят из непрерывно повторяющихся моментов контакта между мяткой и обогреваемым днищем. При создании математической модели вводится плотность потока тепла, создаваемого глухим паром днища чанов. Интенсивный поток пара, образованный в контактном слое, отдаёт своё тепло вы-

шерасположенным и более холодным слоям мятки, частично конденсируясь на них.

В предлагаемой модели влаготепловой обработке в жаровне в отличии от сушки происходит увлажнение и нагреве материала, при которых градиент влагосодержания и температуры направлены в одну сторону – внутрь частиц материала (влажность и температура наружных слоёв частиц в начале процесса значительно больше, чем внутренних). Поэтому потоки влаги, вызываемые влагопроводностью и теплопроводностью, также направлены внутрь частиц.

При применении уравнений тепло- и массопереноса использован способ построения граничных условий, позволяющих получить характеристики, оценивающие движение материала и теплоносителя, которые находятся в различных количественных соотношениях. В первый период влаготепловой обработки мятки в многочанной жаровне впервые был учтен обратный поток теплоносителя.

Полученные результаты позволяют получить математические модели кондуктивного и конвективного тепло- и массопереноса в многочанной жаровне для конкретных семян масличной культуры с выбранной технологией переработки.

**Ключевые слова:** кондуктивная сушка, конвективная сушка, жаренье, тепло- массоперенос, многочанная жаровня, математическая модель, мятка, мезга.

*Постановка проблемы.* В многочанной жаровне производится сложный технологический процесс, цель которого вызвать определённые физико-химические изменения мятки и изменения структуры её частей, которые способствуют наилучшему эффекту при извлечении масла. Этот процесс, называемый жареньем, состоит из двух этапов: первый этап увлажнение и быстрое нагревание мятки и пропаривания с доведением мятки до оптимальной для дальнейшей обработки начальной влажности. Второй этап – высушивание увлажнённой мятки с созданием оптимальной структуры – с доведением её влажности и температуры до оптимальных для прессования величин. Теплофизическими основами кондиционирования по влажности и температуре являются закономерности массо- (влаго-) и теплопереноса. А.В. Лыков приме-

нил 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 наперед заданным законам. Однако теория предназначается для материала и среды, находящегося в неподвижном состоянии [1, 2, 3].

Таким образом, проблемой для создания математической модели кондуктивного и конвективного 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.* При жарении мятки в чанных жаровнях тепло одновременно передаётся тремя различными способами: контактным (кондуктивным) при соприкосновении частиц мятки с нагретыми поверхностями жаровен; термоизлучением от обогреваемых стенок жаровен и днища вышерасположенного чана; конвекцией путём теплообмена между паровоздушной средой в жаровне и частицами мятки [4]. В.В.Белобородов дал подробный анализ состояния работ по кондиционированию по влажности и температуре (жаренье) мятки в многочанных жаровнях. В заключение своего анализа автор делает вывод. Жаренье с точки зрения массо- и теплопереноса является сложным процессом. В таком плане оно совершенно не изучалось, и поэтому в настоящее время не представляется возможным дать общие, учитывающие внутренний и внешний массо- и теплоперенос, математические формулировки его закономерностей, даже в критериальной форме.

Изучение процесса кинетики влажного жарения мятки семян подсолнечника показали, что увлажнение занимает 15 – 20% всего времени жарения, сушка 85 – 80% [5]. Согласно проведенным исследованиям [6], установлено, что на скорость процесса сушки оказывают влияния начальная влажность мят-

ки, температура греющей поверхности (давление пара), высота слоя мятки в чане и частота вращения мешалки.

При составлении математических моделей более целесообразно не задавать закон изменения потенциалов в среде, а пользоваться балансовыми уравнениями, непосредственно отражающими изменения потенциалов [7]. Для того, чтобы получить математические модели процессов сушки в условиях непрерывного движения высушиваемого материала и теплоносителя граничные условия составляются с помощью уравнений материального и теплового балансов [8]. На основе составленных балансовых уравнений для потоков, определяются переменные значения потенциалов, от которых зависит скорость процесса. Этим открывается возможность оценки процесса при движении влажных материалами и газовой среды с различными структурами потока среды.

*Цель исследования.* Целью данной работы является установление закономерностей происходящих при влаготепловой обработке мятки в многочанной жаровне и разработка математической модели для их описания.

*Основная часть.* В соответствии с технологическим регламентом, инактивацию ферментной системы полученной мятки проводят в шнеке-инактиваторе увлажнением и нагревом в течение 30 – 40 с насыщенным паром до влажности 9,0 – 10,0% и температуры 85 – 90<sup>0</sup> С.

Из шнека-инактиватора мятка поступает в многочанную жаровню. В верхнем чане жаровни влажность мятки доводят до 13,0 – 13,5%. Увлажнённую мятку подвергают дальнейшей тепловой обработке в самопропаривающихся слоях толщиной 350 – 450 мм с доведением влажности при входе в пресс до 5,0 – 6,0% и температуры 100 – 105<sup>0</sup> С [9]

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 неравномерное

и несимметричное: в контактном слое, прилегающем к горячей поверхности минимальное 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.

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).

При жаренье в многочанной жаровне время контакта мезги с поверхностью обогреваемого днища чана определим по частоте вращения мешалки (ножей). И при анализе будем варьировать не частотой вращения мешалки, а временем контакта. При жаренье контактная сушка и нагрев состоят из непрерывно повторяющихся моментов контакта между мяткой и обогреваемым днищем.

Плотность потока тепла, создаваемого глухим паром днища чанов, определим из выражения

$$q_q(\tau) = \frac{D(i-q)}{F} \quad (1)$$

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>.

В общем случае при наличии переноса влаги распространение тепла в материале осуществляется посредством теплопроводности и путём переноса его паром и влагой, т.е.

$$q_q(\tau) = \lambda \partial t / \partial n + h_{п} j_{п} + h_{вл} j_{вл}, \quad (2)$$

где  $\lambda_q$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $h$  – удельная энтальпия, Дж/кг; индекс «п» обозначает пар, а

индекс «вл» – влаги;  $n$  – направление нормали к поверхности тела (в нашем случае  $n = x$ );  $j_{п}$  – плотность потока влаги,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  (интенсивность).

Это уравнение использовалось в качестве расчётного соотношения при анализе полей температур в первом периоде.

Можно пренебречь величиной плотности потока тепла, переносимого жидкостью.

Тогда будем иметь плотность потока пара:

$$j_{п} = \frac{D(i - q) + \lambda \partial t / \partial n}{h_{п}}. \quad (3)$$

По соотношению (3) можно вычислить плотность потока пара в сечениях материала, расположенных вблизи греющих поверхностей.

Основное уравнение тепло и влагообмена для контактной сушки на греющей поверхности имеет вид [10]:

$$\lambda_{э} (\nabla t)_{гр} + c \rho_o R_v \frac{dt}{d\tau} + rj + \alpha_q (t_{п} - t_c) = 0, \quad (4)$$

где  $\lambda_{э}$  – эквивалентный коэффициент теплопроводности, учитывающий и перенос тепла паром,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $\nabla t_{гр}$  – температурный градиент внутри материала на границе соприкосновения с нагретой поверхностью,  $\text{К}^0/\text{м}$ ;  $\nabla$  – оператор Гамильтона;  $R_v$  – отношение объёма тела к его поверхности;  $\rho_o$  – плотность сухого тела;  $r$  – удельная теплота испарения,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;  $j_{вл}$  – плотность потока влаги,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;  $\alpha_q$  – коэффициент теплообмена (теплоотдачи),  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $R_v$  – отношение объёма тела к его поверхности, м. Индекс «п» обозначает поверхность материала, а «с» – окружающую среду.

Для первого периода сушки уравнение (4) можно упростить. Потеря тепла в окружающую среду мала по сравнению с теплом, затрачиваемым на испарение. Поэтому приближённо можно написать:

$$q = -\lambda_3 (\nabla t)_{\text{гр}} = rj. \quad (5)$$

Таким образом, по величине  $\lambda_3$  и  $(\nabla t)_{\text{гр}}$  можно определить плотность потоков тепла  $q$  и влаги  $j_{\text{вл}}$ .

Температурный градиент внутри материала вблизи греющей поверхности благодаря малой толщине контактного слоя  $h_{\text{к}}$  можно определить по соотношению

$$-(\nabla t)_{\text{гр}} = \frac{t_{\text{гр}} - t_{\text{к}}}{h_{\text{к}}}. \quad (6)$$

Уравнение теплового баланса имеет вид:

$$q_{\text{п}}(\tau) = q_{\text{т}} + q_{\text{к}} = r\rho_o R_v \frac{d\bar{u}}{d\tau} (1 + Rb), \quad (7)$$

где индексы «т» и «к» обозначают соответственно передачу тепла теплопроводностью и конвекцией.

С теплофизической точки зрения принципиальное различие между первым и вторым этапами «влажного» жаренья состоит в следующем. При увлажнении и нагреве материала градиент влагосодержания и температуры направлены в одну сторону – внутрь частиц материала (влажность и температура наружных слоёв частиц в начале процесса значительно больше, чем внутренних). Поэтому потоки влаги, вызываемые влаготеплопроводностью и теплопроводностью, также направлены внутрь частиц – происходит увлажнение и прогрев внутренних слоёв частиц. Одновременно начинает испаряться часть влаги наружных слоёв частиц. Совокупность этих явлений приводит к тому, что знак градиента влагосодержания меняется на обратный – влажность внутренних слоёв частиц становится больше влажности наружных

Внутренний тепло- и массообмен, происходящий при влаготепловой обработке мятки в чане можно количественно описать с помощью системы дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса, предложенной А.В. Лыковым, которая

при отсутствии градиента общего давления представляется в таком виде:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a_{\tau} \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{\Gamma}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\varepsilon r_c}{c} \frac{\partial U}{\partial \tau}; \quad (8)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \left( \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{\Gamma}{r} \frac{\partial U}{\partial r} \right) + a_m \delta \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{\Gamma}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right). \quad (9)$$

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<sup>0</sup>;  $a_{\tau}$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $a_{\tau} = \lambda / c \rho_0$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К<sup>0</sup>);  $c$  – теплоёмкость материала, Дж/(кг·К<sup>0</sup>);  $\rho_0$  – плотность абсолютно сухого тела, кг/м<sup>3</sup>.

Система уравнений (8, 9) определяет нестационарные поля температур и концентраций во влажном материале в зависимости от состояния на границах. В качестве одного граничного условия используем условие симметрии

$$\left( \frac{\partial U}{\partial r} \right)_{r=0} = \left( \frac{\partial t}{\partial r} \right)_{r=0} = 0. \quad (10)$$

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. В работе [8] эта методика использовалась для сушки, мы используем её для увлажнения.



На первом этапе влажного типа жарения 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:

поток массы  $j$  в материале за счёт диффузии

$$j = a_m \rho_0 \nabla U \quad (11)$$

и с учётом явления термодиффузии

$$j = a_m \rho_0 (\nabla U + \delta \nabla t); \quad (12)$$

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

$$j = B(P_c - P_s); \quad (13)$$

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 жаровни, определяется из выражения (1).

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

Уравнения материального баланса. Для прямого движения мятки в первом чане жаровни материальный баланс запишем

$$G(W - W_1) = V(x_o - x) \quad (14)$$

где  $G$  – расход сухого жирного вещества мятки, кг сухого материала/с;  $V$  – расход теплоносителя, кг сухого теплоносителя/с;  $W, W_o, W_1$  – текущее, начальное и полученное после внесения воды в мятку среднее по объёму влагосодержание

материала, кг/кг сухого материала;  $x_o$  – влагосодержание теплоносителя на входе в зону, кг/кг сухого теплоносителя;  $x$  – текущее влагосодержание теплоносителя, кг/кг сухого теплоносителя;  $\alpha = \frac{V}{G}$  – удельный расход теплоносителя.

$$x = x_o - \frac{1}{\alpha}(W - W_1). \quad (15)$$

Влагосодержание газовой среды равно [11]

$$x = A \frac{\varphi_T P_s}{P - \varphi_T P_s} \quad (16)$$

где  $A = R_T / R_{II}$ ,  $R_T, R_{II}$  – газовые константы (если теплоноситель воздух  $A = 0,622$ );  $P$  – общее давление, Н/м<sup>2</sup>;  $\varphi_T$  – относительная влажность теплоносителя,  $\varphi_T = P_c / P_s$ .

На основании уравнений (15) и (16) для прямого движения получаем

$$\varphi_T P_s = \frac{P \left( x_o + \frac{W - W_1}{\alpha} \right)}{A + x_o + \frac{W - W_1}{\alpha}}. \quad (17)$$

Уравнение (17) является нелинейным. Однако его можно представить с незначительной потерей точности как линейное

$$\varphi_T P_s = \frac{P \left( x_o + \frac{W - W_1}{\alpha} \right)}{A}. \quad (18)$$

поскольку согласно [11] в знаменателе формулы (17) величина  $A$  значительно больше остальной части, т.е.

$$A \frac{W - W_1}{\alpha} + x_o \quad (19)$$

Балансовое уравнение на границе по потоку влаги на основании (11) и (18) для прямого движения представим

$$a_m \rho_o \left( \frac{\partial U}{\partial r} \right)_{\Pi} = BP_c \left[ 1 - \frac{AP_s \alpha}{\Pi(\alpha x_o + W - W_1)} \right]; \quad (20)$$

где индекс  $\Pi$  обозначает поверхность.

Балансовое уравнение на границе по потоку влаги на основании уравнений (12), (18) для прямого движения с учётом термодиффузии представим

$$a_m \rho_o \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial r} \right)_{\Pi} + \delta \left( \frac{\partial t}{\partial r} \right)_{\Pi} \right] = BP_c \left[ 1 - \frac{AP_s \alpha}{\Pi(\alpha x_o + W - W_1)} \right]; \quad (21)$$

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

$$\alpha_T (t_T - t_{\Pi}) + \frac{D}{F} (i - q) = \lambda \left( \frac{dt}{dr} \right)_{\Pi} + (1 - \varepsilon) r_c j, \quad (22)$$

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 прямом движении

$$Vc_T (t_{T.H} - t_T) + \frac{D}{F} (i - q) = (1 + Rb) r_c G \Delta W \quad (23)$$

или

$$t_T = t_{T.H} + \frac{D}{FVc_T} (i - q) - \frac{(1 + Rb) r_c \Delta W}{\alpha c_T}. \quad (24)$$

где  $\alpha_T$  — коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}$ ;  $t_T$  — текущая температура теплоносителя, град;  $t_{T.H}$  — начальная температура на входе в зону;  $t_{T.K}$  — конечная температура тепло-

носителя на выходе из зоны;  $C_T$  – теплоёмкость теплоносителя, Дж/кг·град;  $D$  – 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 в условиях идеального вытеснения из уравнений (13), (15), (18), (22), (24) для проточного движения получим

$$\alpha_T \left[ t_{T.H} - \frac{(1 + Rb)r_c(W - W_1)}{\alpha C_T} + \frac{D}{FVc_T}(i - q) - t_n \right] = \lambda \left( \frac{\partial t}{\partial r} \right)_n + (1 - \varepsilon)r_c B P_c \left[ 1 - \frac{A P_s \alpha}{\Pi(\alpha x_o + W - W_1)} \right]; \quad (25)$$

Уравнение (20) соответствует граничным условиям в случае, если теплоноситель перемещается в режиме идеального вытеснения [12, 13]. Однако в реальных условиях газовая среда движется зачастую в режиме, значительно отличающемся от режима идеального вытеснения, поскольку заметно проявляется обратное перемешивание [14].

С учётом обратного потока теплоносителя уравнение материального баланса примет вид

$$G(W - W_1) + V(x - x^*) + \rho f D_L \left[ \left( \frac{dx}{dl} \right)_{l=0} - \frac{dx}{dl} \right] = 0 \quad (26)$$

или

$$x = x^* + \frac{1}{\alpha}(W - W_1) - \frac{D_L}{U_T} \left[ \left( \frac{dx}{dl} \right)_{l=0} - \frac{dx}{dl} \right]. \quad (27)$$

$$x^* = x_o + \frac{D_L}{U_T} \left( \frac{dx}{dl} \right)_{l=0}. \quad (28)$$

где  $\rho f D_L \left( \frac{dx}{dl} \right)_{l=0}$  – член балансового уравнения, учитывающий интенсивность обратного перемешивания теплоно-

сителя [14];  $\rho$  – плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>;  $f$  – живое сечение аппарата, м<sup>2</sup>;  $D_L$  – коэффициент обратного перемешивания, м<sup>2</sup>/с;  $l$  – длина аппарата текущая, м;  $U_T$  – скорость теплоносителя.

Балансовое уравнение на границе по потоку влаги с учётом обратного перемешивания для прямоточного движения на основании уравнений (11), (13), (18), (27) принимает вид

$$\begin{aligned} a_m \rho_o \left( \frac{\partial U}{\partial r} \right)_n &= \\ &= BP_c \left[ 1 - \frac{AP_s}{\Pi} \left\{ x^* + \frac{1}{\alpha} (W - W_1) - \frac{D_L}{U_T} \left[ \left( \frac{dx}{dl} \right)_{l=0} - \frac{dx}{dl} \right] \right\}^{-1} \right]; \end{aligned} \quad (29)$$

Балансовое уравнение на границе по потоку влаги с учётом явления термодиффузии и обратного перемешивания при прямоточном движении из уравнений (12), (13), (18), (27) получим

$$\begin{aligned} a_m \rho_o \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial r} \right)_n + \delta \left( \frac{\partial t}{\partial r} \right)_n \right] &= \\ &= BP_c \left[ 1 - \frac{AP_s}{\Pi} \left\{ x^* + \frac{1}{\alpha} (W - W_1) - \frac{D_L}{U_T} \left[ \left( \frac{dx}{dl} \right)_{l=0} - \frac{dx}{dl} \right] \right\}^{-1} \right]; \end{aligned} \quad (30)$$

Уравнение (25) соответствует граничным условиям, когда теплоноситель движется в режиме идеального вытеснения.

При наличии обратного перемешивания балансовое уравнение по тепловому потоку на границе можно составить с помощью схемы (рис. 1)

На основании рис. 1 получаем

$$\begin{aligned} Vc_T (t_T^* - t_T) + \frac{D}{F} (i - q) - (1 + Rb) Gr_c (W - W_1) - \\ - \rho f c_T D_L \left\{ \left( \frac{dt_T}{dl} \right)_{l=0} - \frac{dt_T}{dl} \right\} = 0. \end{aligned} \quad (31)$$

или

$$t_{\tau} = t_{\tau}^* + \frac{D}{FVc_{\tau}}(i - q) - \frac{(1 + Rb)r_c(W - W_1)}{\alpha c_{\tau}} - \frac{D_L}{u_{\tau}} \left[ \left( \frac{dt_{\tau}}{dl} \right)_{l=0} - \frac{dt_{\tau}}{dl} \right], \quad (32)$$

где

$$t_{\tau}^* = t_{\tau,н} + \frac{D_L}{u_{\tau}} \left( \frac{dt_{\tau}}{dl} \right)_{l=0}. \quad (33)$$

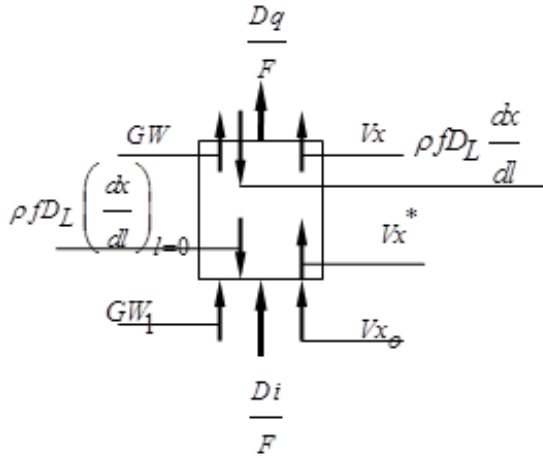


Рисунок 1 – Схема массовых потоков при проточном движении

Балансовое уравнение по тепловому потоку на границе с учётом обратного перемешивания на основании уравнений (13), (18), (22), (24), (32) для проточного движения получим:

$$\begin{aligned} & \alpha_{\tau} \left\{ t_{\tau}^* + \frac{D}{FVc_{\tau}}(i - q) - \frac{(1 + Rb)r_c(W - W_1)}{\alpha c_{\tau}} - \frac{D_L}{u_{\tau}} \left[ \left( \frac{dt_{\tau}}{dl} \right)_{l=0} - \frac{dt_{\tau}}{dl} \right] - t_{\tau} \right\} = \\ & = (1 - \varepsilon)r_c BP_c + \left[ 1 - \frac{AP_s}{\Pi} \left\{ x^* + \frac{1}{\alpha}(W - W_1) - \frac{D_L}{U_{\tau}} \left[ \left( \frac{dx}{dl} \right)_{l=0} - \frac{dx}{dl} \right] \right\}^{-1} \right] \\ & + \lambda \left( \frac{dt}{dr} \right)_{\text{н}}; \end{aligned} \quad (34)$$

Полученные результаты позволяют составить дифференциальные уравнения тепло- и влагопереноса (8) и (9) при

соответствующим образом выбранных краевых условиях 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 неявную схему и метод прогонки, которые в ряде случаев предпочтительнее [15].

#### *Выводы.*

1. Детально изучены и описаны реальные процессы, происходящие при влаготепловой обработке мятки в многочанной жаровне. Впервые предложены уравнения тепло- и влагообмена в подвижном контактном слое у горячей поверхности днища чана, обогреваемого тепловым потоком от конденсации глухого пара. Интенсивный поток пара, образованный в контактном слое, отдаёт своё тепло вышерасположенным и более холодным слоям мятки, частично конденсируясь на них. Использован способ построения граничных условий, позволяющих получить характеристики, оценивающие движение материала и теплоносителя, которые находятся в различных количественных соотношениях.

2. Полученные результаты позволяют получить математические модели кондуктивного и конвективного тепло- и массопереноса в многочанной жаровне для конкретных семян масличной культуры с выбранной технологией переработки.

3. Найденные 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 приведёт к повышению эффективности производства и качества продукции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков А.В. Теория переноса энергии и вещества / А. Лыков, Ю. Михайлов. – Минск АН БССР, 1959. – 330 с.
2. Лыков А.В. Теория тепло- и массопереноса /А . Лыков, Ю. Михайлов. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 535 с.

3. Эккерд Э.Р. Теория тепло- и массообмена / Эккерд Э.Р., Дрейк Р.М. – М.: Госэнергоиздат, 1961.

4. Белобородов В.В. Основы процессов производства растительных масел / В.В. Белобородов – М.: Пищевая промышленность, 1966 – 478 с.

5. Масликов В.А. Технологическое оборудование производства растительных масел / В.А. Масликов [2-е изд. перер. и доп.] – М.: Пищевая промышленность, 1974. – 239 с.

6. Масликов В.А. Кинетика жарения подсолнечной мятки / В.А. Масликов, С.Г. Тарасов. – Известия вузов. Пищевая технология, 1965, №2, с.147.

7. Аксельруд Г.А. Теория диффузионного извлечения веществ из пористых тел / Аксельруд Г.А. – Львов, 1959.

8. Мазяк З. Ю. Тепло- и массоперенос в пористых телах при переменных потенциалах в среде / Мазяк З.Ю. – Львов: Вища школа, Изд во при Львовском ун-те, 1979. – 120 с

9. Дидур В.А. Технология переработки семян клещевины на малотоннажных предприятиях/ В.А. Дидур, В.А. Ткаченко // Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти – Вип. 2. – Мелітополь: Копіцентр «Документ-сервіс», 2014.– С. 21-36.

10. Лыков А.В. Теория сушки / А.В. Лыков – М.: Энергия, 1968. – 472 с.

11. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин – М.: Химия, 1971 – 750 с.

12. Аксельруд Г.А. Массообмен в системе твёрдое тело – жидкость / Аксельруд Г.А. – Львов, 1970. – 187 с.

13. Бояринов А.И. Методы оптимизации в химической технологии. Изд. 2-е / Бояринов А.И., Кафаров В.В. – М.: Химия, 1975 – 576 с

14. Аэров М.Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем / Аэров М.Э., Годес О.М. – Л.: 1968 – 610 с.

15. Демидович Б. П. Численные методы анализа / Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. – М.: Наука, 1967. – 368 с.

## BIBLIOGRAPHY

1. Likov A.V. The theory of carrying over of energy and substance / A. Likov, J. Michaylov. – Minsk AN BSSR, 1959. – 330 s.



2. Likov A.V. The theory warmly - and masso - carrying over // A. Likov, J. Michaylov – M. – L.: Publishing house energy, 1963 – 535 s.
3. Ekkerd E. P. The theory warmly - and masso an exchange / Ekkerd E. P., Dreyk R. M. – M: Publishing house energy, 1961.
4. Beloborodov V. V. The food-processing industry /V. V. Beloborodov – M: The food-processing industry, 1966. – 478 s.
5. Maslikov V. A. The process equipment of manufacture of vegetable oils /V. A. Maslikov – M.: The food-processing industry, 1974. – 239 s.
6. Maslikov V. A. Processing the crushed seeds sunflower /V. A. Maslikov, S. G. Tarasov. – News of institutes. Food technology, 1965, №2, – S 147.
7. Akselrud G. A. The theory extraction of substances from porous bodies a diffusion method / Akselrud G. A. – Lvov, 1959.
8. Mazjak Z. Heat- and masso carrying over to porous bodies at variable potentials in the environment / Mazjak Z – Lvov: The higher school, 1979. – 120 s.
9. Didur V. A. Technology of processing of seeds Ricinus at the enterprises of small productivity / Didur V. A., Tkachenko V. A. // The bulletin of the Ukrainian branch of the International academy of agrarian formation – Rel. 2/- Melitopol: The document-service, 2014/ - S. 21-36.
10. Likov A. V. The drying theory /Likov A. V. – M.: Energy, 1968. – 472 s.
11. Kasatkin A. G. The basic processes and devices of chemical technology /A. G. Kasatkin – M.: Chemistry, 1971. – 750 s.
12. Akselrud G. A. Macco an exchange in system a firm body - a liquid / Akselrud G. A. – Lvov: The Lvov university, 1970. – 187 s.
13. Bojarinov A. I. Optimisation methods in chemical technology / Bojarinov A. I. – Lvov: Chemistry, 1975. – 576 s.
14. Aerov M. E. Hydraulic and thermal bases of work of devices with stationary and boiling a granular layer / Aerov M. E., Todes O. M. – L.: 1968. – 610 s.
15. Demidovich B. P. Numerical methods of the analysis / Demidovich B. P., Maron I.A., Schuvalova E. Z. – M.: Science, 1967. – 368 s.

## MATHEMATICAL MODEL OF CONDUCTIVE AND CONVECTIVE HEAT AND MASS TRANSFER IN A MULTIVAT BRAZIER

V. A. Didur, V.A. Tkachenko, A.V. Tkachenko, V.V. Didur

### *Summary*

The real processes occurring during hydrothermal treatment of wrinkled seeds in a multivat brazier are described in detail. The authors suggest the equations of heat and moisture transfer in the mobile contact layer at a hot surface of the tub bottom warmed by a thermal stream from deaf steam condensation. While frying in multivat brazier, contact time of the crushed seeds with a surface of the warmed bottom of a tub can be defined from the frequency of a mixer (knives). And in the analyses it is necessary to vary not the frequency of the mixer rotation, but the contact time. In the process of frying, contact drying and heating consist of continuously repeating moments of contact between the crushed seeds and the warmed bottom. In creation of mathematical model the density of a heat stream created by the deaf steam of the vat bottom is entered. The intensive steam stream formed in a contact layer, gives its warmth to the colder crashed seeds layers, being partially condensed on them.

In the suggested model of hydro-thermal processing in a brazier, unlike drying, there is a humidifying and heating of the material at which moisture content and temperature gradient are directed to one side – inside material particles (humidity and temperature of external layers of particles in the beginning of the process is much more, than internal). Therefore the streams of moisture caused by conductivity of a moisture and warmth conductivity, also are directed inside the particles.

The results allow receiving mathematical models of conductive and convective heat and mass transfer in multivat brazier for particular seeds of olive culture with the chosen technology of processing.

**Key words:** conductive drying, convective drying, frying, heat and mass transfer, multivat brazier, mathematical model, crushed seeds, marc.