

2. Соловей В. В. Плазмохимическая технология утилизации углеводородосодержащих отходов/Соловей В. В., Лисев В. Н., Воловина Т.В., Кухарская А.В. //Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2006. – Т.9, №2. – 34-35с.
3. [http://newchemistry.ru/letter.php?n\\_id=1836](http://newchemistry.ru/letter.php?n_id=1836)
4. Е. Н. Савинов Фотокаталитические методы очистки воды и воздуха/ Е. Н. Савинов// Соросовский образовательный журнал. – 2000. – Т. 6, №11. – 52 – 56с.
5. В.Я. Кофман Новые окислительные технологии очистки воды и сточных вод/ В.Я. Кофман//Водоснабжение и санитарная техника. – 2013. - №10. – 32-38с.
6. Долінський А.А. Современные методы очистки и нейтрализации промышленных стоков/ Долінський А.А., Шурчкова Ю.О., Радченко Н.Л.// Промышленная теплотехника. – 2014. – Т. 36, №6. – 89-106с

УДК [664.723.011:633.11]:631.365

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ПШЕНИЦЫ В СУШИЛКЕ НА БАЗЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ТЕРМОСИФОНА

Безбах И.В., канд. техн. наук, доц., Воскресенская Е.В., инженер каф. ПАиЭМ  
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса, Украина

*Исследовательский интерес статьи посвящен моделированию процесса сушки пшеницы в сушилке на основе вращающегося термосифона. Актуальность вопроса продиктована необходимостью снижения энергозатрат на процесс сушки пшеницы в аграрных масштабах. В связи с этим, разрабатываются и исследуются новые энергоэффективные конструкции сушильных аппаратов.*

*The research interest of current paper is devoted to the modeling of drying process of wheat in drier with rotating thermosyphon. The actuality of problem is dictated by the necessity of wheat drying power inputs decrease in agricultural scales. In view of this new energy efficient constructions of drying apparatuses are being elaborated and researched.*

Ключевые слова: сушка пшеницы, вращающийся термосифон

Анализ состояния зерносушильной техники на пищевых предприятиях Украины показывает, что в 48% случаев эксплуатируются шахтные агрегаты отечественного производства, энергозатраты которых составляют 5 МДж/кг и выше. При модернизации предприятий многие аграрии собираются уделить внимание участкам сушки (до 15 %) как одним из наиболее затратных в составе зернохранилищ [1]. Недостатки шахтных конвективных зерносушилок: невысокий КПД использования объема сушильного аппарата; малый удельный съем влаги; неравномерность сушки; высокие энергозатраты.

Гораздо реже (5 %) для сушки зерновых применяют сушилки с использованием водяного пара в качестве тепло- влагоносителя [1]. Такие сушилки обеспечивают высокие коэффициенты теплопередачи 30-90 Вт/м<sup>2</sup> К. Недостатки конструкций: сложная аппаратурно-техническая реализация, необходимы дополнительные устройства для подачи пара, отвода конденсата, образование водяных пробок в трубках, низкая степень перемешивания зернового потока.

В связи с этим вопрос разработки новых видов зерносушильной техники актуален. Решение проблемы – использование термосифонов (ТС), вращающихся термосифонов (ВТС), тепловых труб в технологиях сушки, утилизации теплоты уходящих газов зерносушильных установок. Использование схем на базе ВТС даст возможность экономии до 30 % энергии.

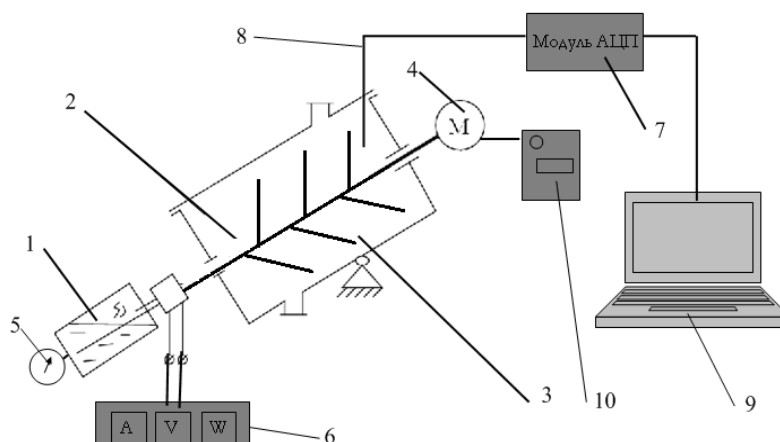
Сушилка с вращающимся термосифоном (рис. 1) состоит из корпуса 1, конденсатора 2, испарителя 3, привода 4. ВТС представляют собой герметично закрытую полость, частично заполненную теплоносителем.

При подводе теплоты к испарителю теплоноситель начинает кипеть, образующийся пар направляется в конденсатор, где конденсируется на стенках, отдавая теплоту фазового перехода охлаждающей среде. Пар перемещается за счет разности давления в испарителе и конденсаторе в результате уменьшения объема при конденсации пара. Конденсат под действием гравитационных сил движется в испаритель. Таким образом, в ВТС реализуется замкнутый испарительно-конденсационный цикл.

Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из парогенератора 1; конденсатора 2; корпуса 3; привода 4; манометра 5; измерительного комплекса К-50; аналого-цифрового преобразователя 7; термодатчики 8; компьютера 9; частотного преобразователя 10.

Медь - константановые термодатчики, отградуированные в диапазоне температур 0÷100 °С, размещены

в капиллярах из нержавеющей стали. Наружный диаметр капилляров 1 мм, длина термодатчика 50 мм. Термопары выполнены в виде термошупов и позволяют измерять температуру продукта в различных точках объема продукта. Спай термопары герметизировался и электролизовался тонким слоем эпоксидной смолы. Термопары коммутировались к АЦП.



1 – парогенератор; 2 – конденсатор; 3 – корпус; 4 – привод; 5 – манометр;  
6 – измерительный комплекс K-50; 7 – АЦП; 8 – термопары;  
9 – компьютер; 10 – частотный преобразователь

**Рис. 1 – Схема экспериментальной установки**

Величина электрического напряжения, подаваемого на нагреватель парогенератора, регулировалась и измерялась с помощью комплекса K-50.

Величина давления теплоносителя в конденсаторе ВТС контролировалась при помощи манометра МВРЗ-У.

Для модельных продуктов был выбран различный диапазон измеряемых величин (табл. 1).

**Таблица 1 – Условия экспериментальных исследований**

| Продукт          | На-<br>клон<br>ВТС, $\gamma$ | Частота оборотов<br>ВТС, n | Давление в конден-<br>саторе ВТС, Р | Подводимая<br>мощность | Влажность про-<br>дуктов началь-<br>ная, $\omega_n$ , % |
|------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------|
|                  | градус                       | мин-1                      | МПа                                 | кВт                    |                                                         |
| Пшеница          | 30...45                      | 14                         | 0,05...0,15                         | 0,8...1,5              | 20                                                      |
| Варёный<br>горох |                              |                            |                                     |                        | 25                                                      |
| Амарант          |                              |                            |                                     |                        | 20                                                      |

Начальная влажность продуктов поддерживалась на уровне либо технологических требований, либо выбиралась из соответствующих таблиц.

Конечная влажность продуктов обычно выбиралась из таблиц как равновесная для данных атмосферных условий.

Температура поверхности конденсатора ВТС поддерживалась такой, чтобы не происходило перегрева продукта выше технологических требований.

Частота вращения конденсатора ВТС регулировалась при помощи частотного преобразователя типа Altivar.

Температуру зерна пшеницы измеряли при помощи медь-константановых термопар. Температуры измеряли в нескольких разных точках объема, после чего усредняли. Данные первичных преобразователей температуры поступали на АЦП, преобразовывались в цифровой сигнал и вводились в ПК. Интервал регистрации данных – 10 с. Температуру теплоносителя определяли по величине давления в конденсаторе сушилки. Интервал регистрации данных – 600 с. Зерно сушили до состояния несколько ниже равновесной влажности. Средняя влажность воздуха в лаборатории 80 %. Средняя температура зерна в опытах 60...80 °С. По данным [2] при таких условиях равновесная влажность зерна 14...16 %. Аппарат работал периодическом режиме. Единовременная загрузка аппарата составляла  $G_3=1,5$  кг, средняя температура

воздуха в помещении  $T_{ос} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , частота оборотов ВТС  $n = 14\text{ об/мин}$ .

При сушке от продукта  $F$  за единицу времени  $\tau$  происходит унос некоторого количества влаги  $M$  при разности давлений  $\Delta P$  это выражается уравнением (1):

$$\beta = \frac{M}{F \cdot (P_{пр} - p_v) \cdot \tau} \quad (1)$$

где:  $\beta$  – коэффициент массоотдачи;

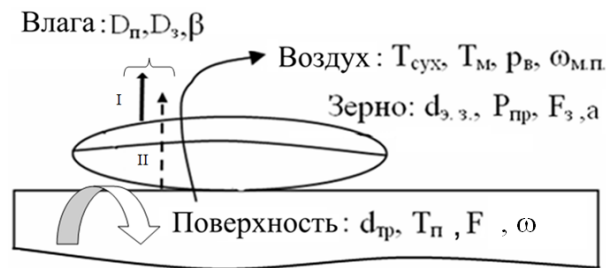
$P_{пр}$  – парциальное давление водяного пара над продуктом;

$p_v$  – парциальное давление водяного пара в воздухе;  $\tau$  – время процесса.

Коэффициент массоотдачи является не физической константой, а характеристикой, зависящей от физических свойств продукта и гидродинамических условий на границе раздела фаз (ламинарный или турбулентный режим течения), связанных, в свою очередь с физическими свойствами фазы, а также с геометрическими факторами. Таким образом, величина  $\beta$  является функцией многих, переменных, что значительно усложняет расчет или опытное определение коэффициентов массоотдачи. Коэффициент массоотдачи является аналогом коэффициента теплоотдачи в процессах переноса тепла.

Рассмотрим процесс сушки зерна в сушилке на базе ВТС (рис. 2). Параметр влажности зависит от времени. Процесс рассматриваем как квазистационарный. Моделирование усложняется тем, что имеет место две фазы. Первая – воздух, движущийся в межзерновом пространстве, вторая – объем зерна, внутри сушилки.

Эквивалентный диаметр зерновки  $d_{э.з.}$ . Зерно перемешивается нагретыми трубками конденсатора. Диаметр трубок  $d_{тр}$ . Площадь поверхности конденсатора  $F$ . Температура поверхности конденсатора ВТС –  $T_{п}$ . Окружная скорость трубки модуля ( $\omega$ ).



$D_n$  – коэффициент диффузии водяного пара в воздухе;  $D_z$  – коэффициент диффузии влаги внутри зерновки;  $\beta$  – коэффициент массоотдачи;  $T_{сух}$  – температура воздуха;  $T_m$  – температура мокрого термометра;  $p_v$  – давление парциальное насыщенного пара в воздухе;  $\omega_{м.п.}$  – скорость воздуха в межзерновом пространстве;  $d_{э.з.}$  – эквивалентный диаметр зерновки;  $P_{пр}$  – давление пара над поверхностью материала;  $F_z$  – площадь зерна;  $a$  – коэффициент теплопроводности зерновки;  $d_{тр}$  – диаметр трубок конденсатора ВТС;  $T_{п}$  – температура поверхности;  $F$  – площадь поверхности конденсатора ВТС,  $\omega$  – окружная скорость конденсатора ВТС

**Рис. 2 – Схема процесса сушки зерна в сушилке на базе ВТС**

Зерновка нагревается за счет контакта с нагретой поверхностью модуля. Давление пара над поверхностью материала  $P_{пр}$ . Площадь зерна  $F_z$ .

Зерновку омывает поток воздуха. Воздух является влагоносителем. Воздух забирает в себя влагу и охлаждает зерно. В отличие от конвективных сушилок, в которых воздух нагревает зерно. Происходит диффузия водяного пара в воздух. Параметры воздушного потока: коэффициент диффузии водяного пара в воздух  $D_n$ ; скорость воздуха в межзерновом пространстве  $\omega_{м.п.}$ ; температура воздуха  $T_{сух}$ ; температура мокрого термометра  $T_m$ ; давление парциальное насыщенного пара в воздухе  $p_v$ .

Движущая сила процесса сушки в первом периоде – разность парциальных давлений водяного пара над продуктом и в воздухе ( $P_{пр} - p_v$ ).

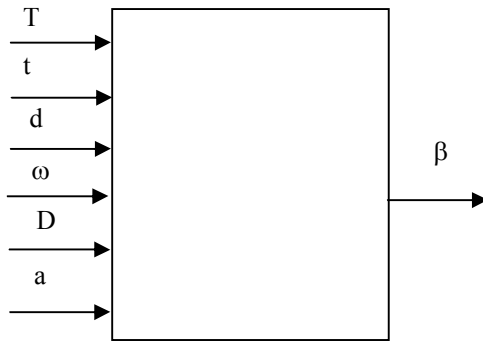
Таким образом, в первом периоде сушки, определяющими для массоотдачи будут условия на границе раздела фаз – режим движения воздуха снаружи зерновки, площадь зерновки, температура поверхности конденсатора ВТС.

Во втором периоде сушки происходит перенос влаги в стесненных условиях. Определяющий параметр – коэффициент диффузии влаги внутри зерновки  $D_z$ .

Интенсивность процесса массоотдачи напрямую связана с температурой нагрева зерна.

Степень нагрева зерна определяется его теплофизическими свойствами – коэффициентом темпера-

туропроводности (а), средней влажностью (ωср).



**Рис. 3 – Параметрическая схема процесса массоотдачи при сушке в сушилке на базе ВТС**

Для определения β составим параметрическую схему. В данном случае надежным способом получения структур критериальных уравнений является метод анализа размерностей (рис. 3) [3,4]. На основе его общих принципов устанавливаем вид критериального уравнения для расчета коэффициента массоотдачи β.

Коэффициент массоотдачи зависит от следующих параметров (рис. 4): температуры поверхности (Т), температуры зерна (t), определяющего размера (d), окружной скорости трубки модуля (ω), скорости диффузии (D), температуропроводности (а).

Допустим, что Т, d, ω, D, t, а имеют неиз-

вестные показатели степени k1, k2, k3, k4, k5, k6 и запишем:

$$\beta = D^{k1} \cdot d^{k2} \cdot \omega^{k3} \cdot T^{k4} \cdot t^{k5} \cdot a^{k6} \quad (2)$$

Все эти параметры состоят из трех основных размерностей: длины (L), времени (τ), температуры (Т) (таб. 2). Размерности параметров, входящих в уравнение (2), известны, его можно записать:

$$(L \cdot \tau^{-1}) = (L^2 \cdot \tau^{-1})^{k1} \cdot (L)^{k2} \cdot (L \cdot \tau^{-1})^{k3} \cdot T^{k4} \cdot t^{k5} \cdot (L^2 \cdot \tau^{-1})^{k6} \quad (3)$$

**Таблица 2 – Список параметров**

| Параметр                           | Символ | Размерность                     |
|------------------------------------|--------|---------------------------------|
| Коэффициент массоотдачи            | β      | L·τ <sup>-1</sup>               |
| Температура                        | T      | T                               |
| Размер частицы                     | d      | L                               |
| Скорость                           | ω      | L·τ <sup>-1</sup>               |
| Коэффициент диффузии               | D      | L <sup>2</sup> ·τ <sup>-1</sup> |
| Коэффициент температуропроводности | a      | L <sup>2</sup> ·τ <sup>-1</sup> |

Условия безразмерности данного выражения выводятся непосредственно из строки в размерной матрице.

**Таблица 3 – Размерная матрица**

|   | D   | d  | ω   | T  | t  | a    | Уравнение              |
|---|-----|----|-----|----|----|------|------------------------|
| T |     |    |     | k4 | k5 |      | k4+k5=0                |
| τ | -k1 |    | -k3 |    |    | k6   | -k1 - k3 -k6=-1        |
| L | 2k1 | k2 | k3  |    |    | 2 k6 | 2k1 + k2 + k3 +2k6 = 1 |

Решаем в символьном виде систему уравнений таблицы 3, подставляем в уравнение (3).

Группируя отдельные величины, получаем критериальное уравнение вида:

$$\frac{\beta \cdot d}{D} = \left( \frac{\omega \cdot d}{a} \right)^{k3} \cdot \left( \frac{t}{T} \right)^{k5} \cdot \left( \frac{a}{D} \right)^{k6} \quad (4)$$

Таким образом, получено уравнение вида:

$$Nu_M = f \left[ Pe, \left( \frac{t}{T} \right), \left( \frac{a}{D} \right) \right] \quad (5),$$

где  $Nu_M = \frac{\beta \cdot d_k}{D}$  – число Нуссельта диффузионное;

$$Pe_T = \frac{\omega}{\alpha} d \quad - \text{число Пекле тепловое};$$

$$\left(\frac{t}{T}\right) \quad - \text{симплекс температур};$$

$$\left(\frac{a}{D}\right) \quad - \text{симплекс відповідаючий за тепло- фізическіе свойства матеріала і воздуха.}$$

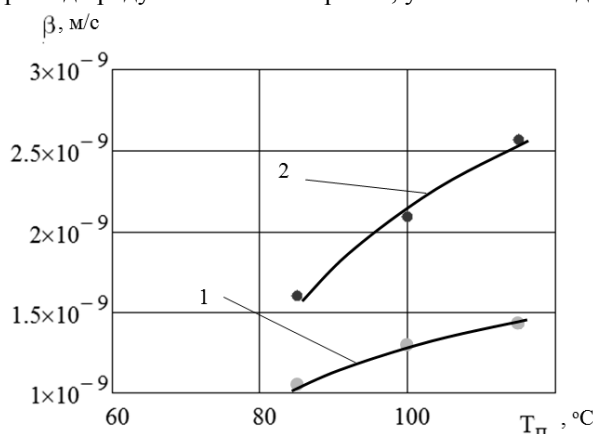
Согласно  $\pi$  – теореме получено 4 безразмерных комплекса (7 переменных, 3 основных размерности).

Неизвестные коэффициенты в уравнении (4) необходимо определить после обобщения экспериментальных данных.

Задача дальнейших экспериментальных исследований – обобщение полученных данных и определение констант в уравнениях в числах подобия.

Коэффициент массоотдачи получаем, используя основное уравнение массоотдачи применительно к первому периоду сушки. В таком случае, движущая сила – разность парциальных давлений над продуктом и в воздухе. В качестве исходных данных используем данные, полученные в результате экспериментов.

Изменение температуры поверхности приводит к росту коэффициента массоотдачи в 1,8 раза (рис. 4). Что связано с влиянием температуры поверхности на температуру зерновки и как следствие росту парциального давления пара над продуктом. Таким образом, увеличивается движущая сила процесса.



1 – при частоте оборотов  $n=14$  об/мин; 2 – при частоте оборотов  $n=28$  об/мин

**Рис. 4 – Зависимость коэффициента массоотдачи от температуры поверхности ВТС**

Изменение частоты оборотов ВТС приводит к росту коэффициента массоотдачи в 1,6 раза. Что связано с обновлением контакта фаз, повышением активной поверхности влагоотдачи за счет перемешивания объема зерна.

Необходимо учесть, как влияет скорость вращения ВТС на интенсивность нагрева зерна. Величина нагрева зерна будет определять скорость удаления влаги от зерновки в воздух. В число Пекле входит окружная скорость вращения трубки конденсатора ВТС. В нашем случае число Пекле отражает, как соотносится передача тепла к зерновому слою за счет конвекции, при вращении конденсатора ВТС, к передаче тепла за счет теплопроводности зернового слоя.

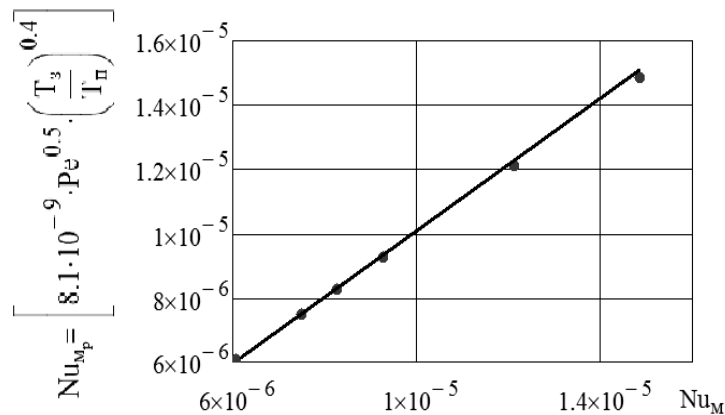
Число Нуссельта диффузионное отражает, как соотносится передача влаги за счет конвективных воздушных токов, к передаче влаги за счет диффузии влаги в воздух.

Полученная модель будет отражать влияние теплообмена на внешний массообмен. Далее необходимо определить степень влияния температуры поверхности ВТС на интенсивность массоотдачи. Рассчитываем симплекс  $T_3/T_{\pi}$ . Показатели степени в уравнении (6) получаем, используя приложение MS Excel.

$$Nu_M = \left[ 8.1 \cdot 10^{-9} \cdot Pe^{0.5} \cdot \left( \frac{T_3}{T_{\pi}} \right)^{0.4} \right] \quad (6)$$

Используя уравнение (6), сможем рассчитывать кинетические коэффициенты в процессе сушки задаваясь различными режимными параметрами установки: частотой вращения ВТС, температурой зерна,

поверхности ВТС. Подставляем в полученное уравнение (6) значения скорости зернового потока и температуры из экспериментального диапазона. Получаем ряд расчетных значений числа Нуссельта  $Nu_{мр}$ . Сравниваем расчетные числа Нуссельта ( $Nu_{мр}$ ) и полученные в результате эксперимента ( $Nu_{м}$ ). Для этого строим график зависимости между расчетными числами Нуссельта и экспериментальными  $Nu_{мр} = f(Nu_{м})$ .



**Рис. 5 – Зависимость между расчетными числами Нуссельта и экспериментальными  $Nu_{мр} = f(Nu_{м})$ .**

Данные аппроксимируются линейной зависимостью, с коэффициентом  $R^2=0,98$ . Полученная модель с высокой точностью описывает полученные экспериментальные данные.

#### Литература

1. Современное состояние и тенденции развития мощностей по хранению зерна в хозяйствах Украины, Журнал «Хранение и переработка зерна»: <http://hipzmag.com/>
2. Атаназевич, В.И. Сушка зерна [Текст]: практ. пособие / В.И. Атаназевич - М.: Лабиринт, 1997. – 256 с.
3. Лыков, А.В. Явления переноса в капиллярнопористых телах [Текст] / А.В. Лыков— М.: Гостехиздат, 1954.
4. Бурдо, О. Г. Прикладное моделирование процессов переноса в технологических системах [Текст] / О. Г. Бурдо, Л. Г. Калинин – О.: Друк, 2008. – 348 с.

УДК 66.069.84+66.074.1

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ СЕПАРАЦІЇ ТА РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ТРИФАЗНОГО СЕПАРАТОРА

Ляпощенко О.О., канд. техн. наук, доцент, докторант, Павленко І.В., канд. техн. наук, старший викладач, Усик Р.Ю., магістрант, Дем'яненко М.М., бакалавр  
Сумський державний університет, м. Суми

*Проаналізовано існуючі конструкції сепараційних пристроїв та запропоновано їх заміну на більш енергоефективні. Досліджено вплив конструктивних і технологічних параметрів сепараційних пристроїв на гідродинаміку потоків. Розроблено методику інженерного розрахунку горизонтального трифазного сепаратора.*

*The existing designs of separation devices are analysed, and their replacement by more energy effective is offered. The influence of structural and technological parameters of separation devices hydrodynamics flows is studied. The technique of engineering calculation of a horizontal three-phase separator is developed.*

**Ключові слова:** трифазний сепаратор, газодинамічний краплевловлювач, сепарація, дегазація, зневоднення, нафта, вуглеводневий газ

Нафта є основною сировиною для нафтопереробних та нафтохімічних виробництв. Продукція свердловин на нафтових родовищах являє собою багатofазну багатокomпонентну суміш, тому вона не прида-