

І.О. Скриннік, канд. техн. наук, М.О. Федотова, ас., М.М. Петренко, проф., канд. техн. наук, О.А. Кислун, доц., канд. техн. наук, Д.В. Богатирьов, доц., канд. техн. наук  
 Кіровоградський національний технічний університет

## Гідродинамічна модель процесу сушіння насіння сільськогосподарських культур для продовольчих потреб

Наведено теоретичні дослідження для визначення параметрів киплячого шару в залежності від параметрів сушарки для отримання раціональних параметрів процесу сушіння. Теоретичні дослідження направлені на зменшення енергетичних витрат  
**шпаруватість, агент сушіння, гідродинамічна модель**

Однією з першочергових задач дослідження параметрів процесу сушіння насінневих культур у стані кипіння є вивчення впливу переміщень агента сушіння. Аналіз наукових праць А.П. Гержоя, А.В. Ликова, С.Д. Птіцина, [1-3] показує значний вплив швидкості агента сушіння на параметри, структуру та гідродинаміку процесу. На сьогоднішній день процес кипіння насінневого матеріалу не достатньо вивчений [4-5]. Саме тому виникає задача визначення закономірності розширення шпаруватості киплячого шару  $\varepsilon_{ш}$  від зміни параметрів процесу (швидкості агента сушіння  $U_a$  та утворення повітряних просторів, частоти виникнення та розмірів повітряних просторів  $\omega_{тн}$ , площі шлейфу  $S_{шл}$  та насіння (товщини, ширини, довжини, зведеного діаметра) та густини  $\rho_n, d$ , тобто, знайти залежність:

$$\varepsilon_{ш} = f(U_a, U_b, D_{тн}, \rho_n, S_{шл}, d, \omega_{тн}). \quad (1)$$

© І.О. Скриннік, М.О. Федотова, М.М. Петренко, О.А. Кислун, Д.В. Богатирьов, 2011

Розглянемо шпаруватість шару як середню об'ємну концентрацію агента сушіння в киплячому шарі. Загальну шпаруватість повітряного простору в неперервній фазі  $\varepsilon_n$  представимо як середню об'ємну концентрацію сферичних включень (повітряних просторів), котрі мають шпаруватість шлейфа  $\varepsilon_{шл}$ , частинки об'єму повітряного простору, зайнятого шлейфом  $S_{шл}$  [6-7].

$$\varepsilon_{ш} = \varepsilon_n (1 - \varphi_n) + \varphi_n \varepsilon_{шл} = \varepsilon_n (1 - \varphi_n) + \varphi_n (1 - S_{шл}) + \varphi_n \varepsilon_{шл} S_{шл}, \quad (2)$$

де  $\varepsilon_{шл}$  – шпаруватість шлейфа;

$S_{шл}$  – площа шлейфа, м<sup>2</sup>;

$\varphi_n$  – об'ємна концентрація повітряного простору;

$\varepsilon_n$  – шпаруватість у неперервній фазі;

$\varepsilon_{тн}$  – шпаруватість повітряного простору.

Тоді у виразі для середньої шпаруватості киплячого середовища в цілому ( $\varepsilon_{ш}$ ) залишається тільки одне невідоме – шпаруватість основної зони шару  $\varepsilon_{ш_2}$ , тобто:

$$\langle \varepsilon_{ш} \rangle \leq (1 + 2\varepsilon_{ш_2}) / 3. \quad (3)$$

Оскільки в основній зоні  $dP_{он_2} / dz = 0$ , приймаємо,  $\varepsilon_{ш_2} = \varepsilon_{ш_2}$ . Тоді з урахуванням (3) отримаємо :

$$\varepsilon_{ш_2} = \varepsilon_{ш_2} \left[ 1 - \varphi_{m_2} (1 - S_{ш_2}) \right] + \varphi_{m_2} (1 - S_{ш_2}). \quad (4)$$

Для визначення параметрів, котрі входять у рівняння (2), що описує розподіл агента сушіння по фазах у киплячому шарі,  $V_a$  – об'ємну витрату агента сушіння в апараті представимо у вигляді:

$$V_a = V_{ан} + V_{ад}. \quad (5)$$

де  $V_{ан}$  – витрата агента сушіння в неперервній фазі,

$V_{ад}$  – витрата агента сушіння в дискретній фазі.

Умову збереження сумарного потоку агента сушіння в киплячому шарі (середній потік в шарі) отримаємо у вигляді :

$$U_a = U_{ан} \varepsilon_n (1 - \varphi_n) + \varphi_n (U_m + U_{кн}), \quad (6)$$

де  $U_{ан}$  – швидкість агента сушіння в неперервній фазі, м/с;

$U_m$  – швидкість підйому повітряного простору, м/с;

$U_{кн}$  – швидкість наскрізного потоку відносно повітряного простору, м/с.

Швидкість руху повітряних просторів агента сушіння  $U_n$ , (згідно [7]), представимо у вигляді:

$$U_n = \left( 1 - \frac{S_{шл} \varphi_n}{1 - \varphi_n} \frac{1 - \varepsilon_{шл}}{1 - \varepsilon_n} \right) U_m, \quad (7)$$

де  $U_m$  – швидкість руху повітряного простору м/с.

Для визначення величини  $U_m$  використовуємо формулу Девіса -Тейлора [7]:

$$U_{омн} = 0,711 \sqrt{g D_{омн}}, \quad (8)$$

де  $D_{омн}$  – еквівалентний діаметр одиничного повітряного простору [7], що визначається за формулою:

$$D_{омн} = 1,4 \rho_n d N z + D_m, \quad (9)$$

де  $z$  – змінна координата (висота), м;

$I$  – число кипіння;

$d$  – діаметр насінини, м;

$D_m$  – початковий діаметр повітряного простору, м.

Оскільки прийнято  $\varepsilon_{шл} = \varepsilon_n$ ,  $U_n = \left(1 - \frac{S_{шл}\varphi_n}{1 - \varphi_n}\right) U_{омн}$  і вираз (7) представимо у вигляді:

$$U_{ac} = U_a \varepsilon_n (1 - \varphi_n) + \varphi_n \left(1 - \frac{S_{шл}\varphi_n}{1 - \varphi_n}\right) U_{омн}. \quad (10)$$

Швидкість частинок насінин  $U_{мчн}$  в безперервній фазі киплячого шару набуває вигляду:

$$U_{мчн} = 1,741 \frac{\nu_a}{d} \sqrt{Ar \varepsilon_n}, \quad (11)$$

де  $\nu_a$  – кінематична в'язкість агента сушіння, Стокс;

$Ar$  – Архімедова сила.

Потік насінин має середню швидкість :

$$U_{мчн} = \frac{S_{шл}(1 - \varepsilon_{шл})\varphi_n}{(1 - \varepsilon_n)(1 - \varphi_n)} U_{об} \approx \frac{S_{шл}\varphi_n}{(1 - \varphi_n)} 0,711 \sqrt{gD_{об}}. \quad (12)$$

Прирівнявши вирази (11) та (12), після нескладних перетворень отримаємо формулу для визначення площі шлейфа :

$$S_{шл} = k_{шл} \frac{(1 - \varphi_n)}{\varphi_n} \frac{\nu_a}{d} \sqrt{Ar \varepsilon_n}, \quad (13)$$

де  $k_{шл}$  – коефіцієнт, що враховує діаметр насіння та їх форму,  $k_{шл} = 0,014$  [7].

З умови зберігання сумарного потоку агента сушіння в киплячому шарі виразимо об'ємний потік агента сушіння в повітряному просторі через відомі параметри :

$$V_m = V_{ac} - V_{ан} = U_{ac} S_a - U_{ан} \varepsilon_n (1 - \varphi_n) S_a, \quad (14)$$

де  $V_a$  – об'ємна витрата агента сушіння в апараті, м<sup>3</sup>/с;

$V_{ан}$  – витрата агента сушіння у неперервній фазі, м<sup>3</sup>/с;

$U_a$  – швидкість агента сушіння, м/с;

$S_a$  – площа апарата, м<sup>2</sup>;

З іншого боку, вираз для  $V_б$  представимо у вигляді:

$$V_m = \omega_m (1 - S_{шл}) V_{омн}, \quad (15)$$

де  $\omega_m$  – частота проходження повітряного простору,  $c^{-1}$ ;  
 $V_m$  – об'єм одиничного повітряного простору,  $m^3$   
 Об'єм одиничного простору дорівнює:

$$V_m = \frac{\pi D_{III}^3}{6} (1 - S_{шл}). \quad (16)$$

Після перетворень (15) та (16) отримаємо вираз для об'ємної концентрації повітряних просторів:

$$\varphi_n = 1 - \frac{U_{ac} S_a - \omega_m (1 - S_{шл}) V_m}{U_{ан} S_a \varepsilon_n}. \quad (17)$$

Шпаруватість в основній зоні киплячого шару в цілому (в безперервній фазі, повітряному просторі та його шлейфах)

$$\varepsilon_{ш} = \varepsilon_n + (1 - \varepsilon_n) (1 - S_{шл}) \left( 1 - \frac{U_{ac} S_a - \omega_m (1 - S_{шл}) V_m}{U_{ан} S_a \varepsilon_n} \right). \quad (18)$$

Частоту проходження повітряних просторів  $\omega_{пб}$ , пов'язану з основною частиною пульсацій тиску, приймаємо згідно з [9]:

$$\omega_m = \frac{1}{\tau_m}. \quad (19)$$

Оскільки  $U_m = 0,711 \sqrt{g D_m}$ , то

$$\omega_m = \frac{U_m}{h_o} = 0,711 \frac{\sqrt{g D_m}}{h_o}. \quad (20)$$

Залежність між шпаруватістю в неперервній фазі  $\varepsilon_n$  та швидкістю агента сушіння в неперервній фазі  $U_{ан}$  виразимо з формули Ергана [7]:

$$U_{ан} = U_{ен} \left( \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_o} \right)^{1,5} \left( \frac{1 - \varepsilon_o}{1 - \varepsilon_n} \right)^{0,5}, \quad (21)$$

де  $U_{ен}$  – швидкість витання насіння, м/с.

Залежність шпаруватості шару  $\varepsilon_{ш}$  від приведенного діаметра  $d$  насінини зображено на рис. 1.

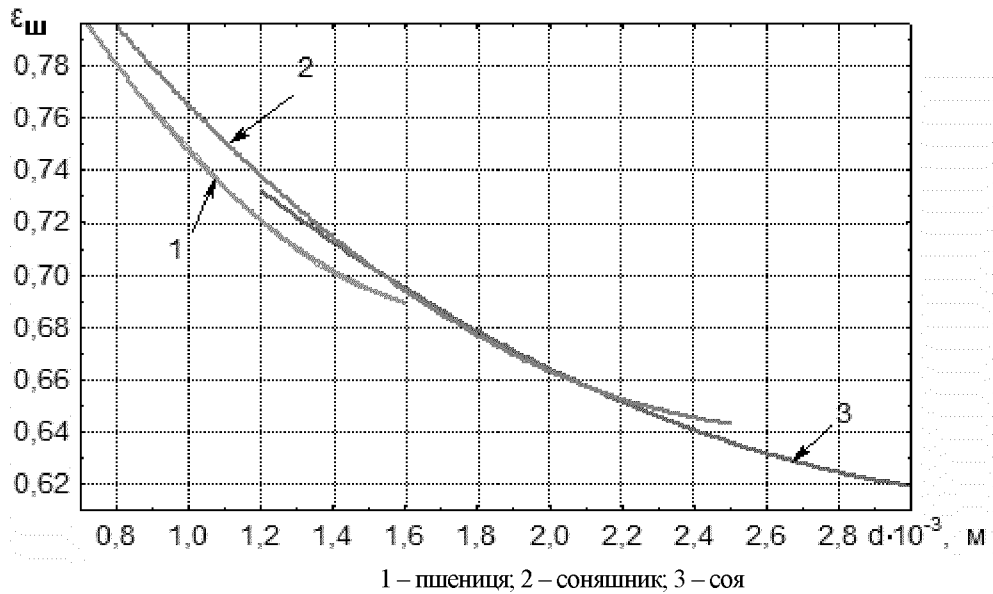


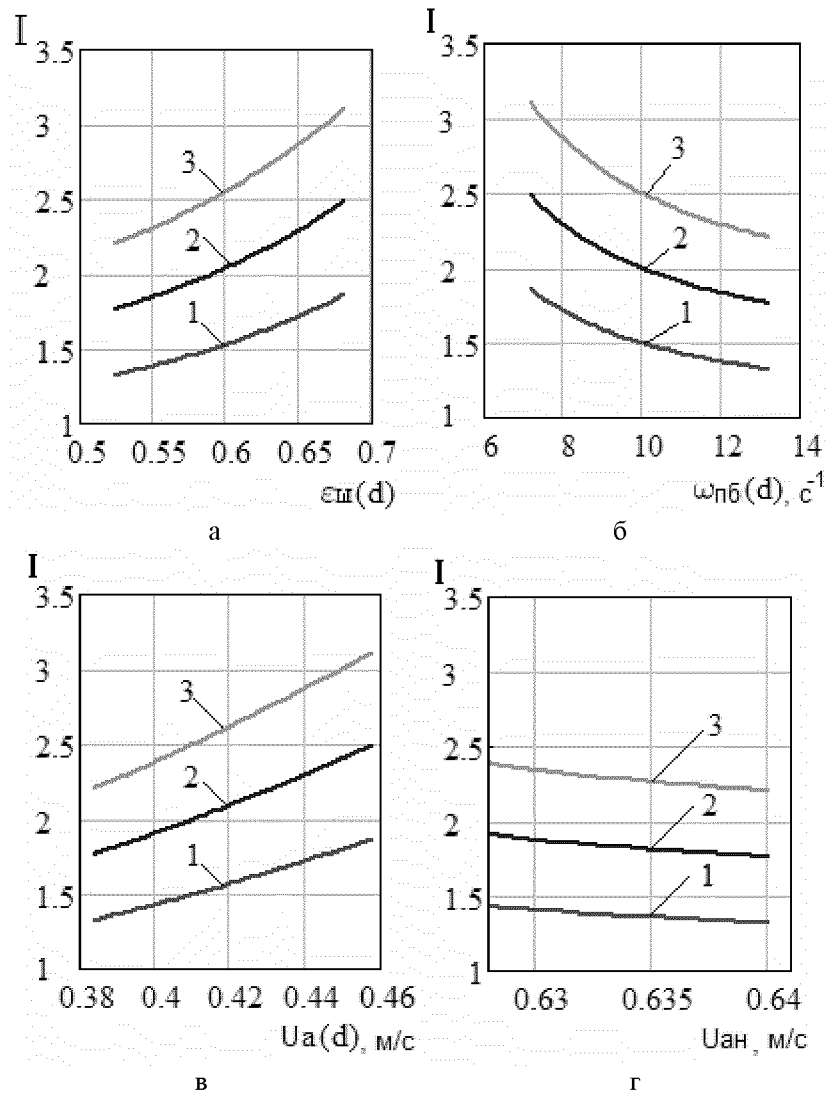
Рисунок 1 – Залежність шпаруватості шару ( $\varepsilon_{ш}$ ) від приведенного діаметра ( $d$ ) насінини різних культур  
 Закономірність зміни шпаруватості киплячого шару відносно крупних насінин залежно від зміни швидкості агента сушіння в апараті  $\varepsilon_{ш} = f(U_a)$  для невеликих чисел кипіння  $I$  ( $2 \leq I \leq 7$ ) має вираз :

$$\varepsilon_{ш} \leq \frac{1}{3} + \frac{2}{3} \left( \varepsilon_n + (1 - \varepsilon_n)(1 - S_{шл}) \left( 1 - \frac{U_{ac} S_a - \omega_m (1 - S_{шл}) V_m}{U_{ан} S_a \varepsilon_n} \right) \right). \quad (22)$$

Кінцева закономірність відносного розширення неоднорідного киплячого шару крупних насінин має вигляд :

$$I = \frac{1,5(1 - \varepsilon_o)}{\left( \varepsilon_n + (1 - \varepsilon_n)(1 - S_{шл}) \left( 1 - \frac{U_{ac} S_a - \omega_m (1 - S_{шл}) V_m}{U_{ан} S_a \varepsilon_n} \right) \right)}. \quad (23)$$

Якщо проаналізувати складові формули (22), то можна прийти до висновку, що більшість з них, а саме  $U_a$  (6),  $U_{ан}$  (21),  $S_{шл}$  (13),  $\omega_m$  (20) залежні від еквівалентного діаметра одиничного повітряного простору  $D_m$  (9), який у свою чергу залежить від приведенного діаметра насінини  $d$ . Чисельний розрахунок виконаний за допомогою пакета прикладних програм MathCAD. На підставі нього отримані такі графічні залежності (рис. 1 – 2).



а – від шпаруватості ( $\epsilon_{ш}$ ); б – від частоти пульсації повітряних просторів ( $\omega_{пб}$ );  
 в – від швидкості агента сушіння ( $U_{ас}$ ); г – від швидкості агента сушіння у неперервній фазі ( $U_{ан}$ ).  
 1 – пшениця; 2 – соняшник; 3 – соя

Рисунок 2 – Залежність ступеня розширення насінневого шару (I):

Аналіз отриманих результатів показує:

1. Побудована гідродинамічна залежність киплячого середовища частинок враховує вплив на розширення шару як швидкості агента сушіння в міні- зерносушарці, так і основних параметрів неперервної та дискретної фази киплячого шару. Із нерівності (23) та залежностей випливає, що розмір повітряних просторів, частота їх проходження та обмін між фазами у киплячому середовищі взаємопов'язані і залежать від параметрів процесу (швидкості агента сушіння та утворення повітряних просторів, частоти виникнення, розмірів повітряних просторів, площі шлейфа), а також насінини (товщини, ширини, довжини, еквівалентного діаметра і густини).

2. Температурний напір між поверхнею нагріву та частинками у прикаскадній зоні є величиною змінною у зв'язку зі зміною середньої температури цих частинок. Тепловий потік на межі частинки з поверхнею нагріву, в основному, передається теплопровідністю через повітряний прошарок між каскадом та частинками. Повітряний прошарок переривається і знову формується в кожній точці контакту частинок зі стінкою. Товщина цих прошарків неоднакова в різних місцях, їх середній розмір залежить від пульсації швидкості агента

сушіння та частоти зміни частинок, розміру часток  $d$  та шпаруватості  $\varepsilon_m$ , тобто, від параметрів, які обумовлюють інтенсивність процесу переносу теплоти.

## Список літератури

1. Гержой А. П., Самочетов В. Д. Зерносушение / А.П. Гержой, В.Д. Самочетов // – М.: Загод. издат, 1951. – 142 с.
2. Лыков А.В. Теория сушки / А.В. Лыков // – М.: Энергия, 1968. – 471 с.
3. Птицын С.Д. Сушка зерна / С.Д. Птицын // – М.: «Высшая школа», 1967. – 164 с.
4. Дворецкий С.М., Королев В.Н., Нагорнов С.А., Таров В.П. Техника и технология псевдооживления: гидродинамика и теплообмен с погруженными телами / С.М. Дворецкий, В.Н. Королев, С.А. Нагорнов, В.П. Таров // – Тамбов 2005. – 168 с.
5. Королев В.Н. Структура псевдооживленного слоя вблизи погруженной в него поверхности / В.Н. Королев // Журнал прикладной химии. – 1973. т 46. № 9. – С. 1956 – 1960.
6. Забродский С.С. О гидравлических сопротивлениях слоя при псевдооживлении в конических аппаратах / С. С. Забродский // Инж.-физ. журнал : – 1961. №2. – С. 92 – 94.
7. Станкевич Г.М., Страхова Т.В., Атаназевич В.І. Сушіння зерна. / Г.М. Станкевич, Т.В. Страхова, В.І. Атаназевич // – К.: Либідь, 1997. – 352 с.
8. Тихонов В.Д. Виды теплообмена между агентом сушки и зерновым материалом / В.Д. Тихонов // Математическое моделирование механических явлений: материалы науч.-техн. конф., 25 – 26 мая 2007 г. / ГОУ ВПО Уральский государственный горный ун-т. – Екатеринбург, 2007. – 254 с.
9. Скринник І.О. Обґрунтування параметрів зерносушарки каскадного типу для обробки насіння у киплячому шарі. – Дис... канд. техн. наук 05.05.11 – Кіровоград: КНТУ, 2010 – 140 с.

*І. Скринник, М. Федотова, Н. Петренко, О. Кислун, Д. Богатырьов*

**Гидродинамическая модель процесса сушки семян сельскохозяйственных культур для продовольственных нужд**

Приведены теоретические исследования для определения параметров кипящего слоя в зависимости от параметров сушки для получения рациональных параметров процесса сушки. Теоретические исследования направлены на уменьшение энергетических затрат

*I. Skrunnik, M. Fedotova, M. Petrenko, O. Kyslun, D. Bogatyryov*

**Hydrodynamic model of the drying process of seed crops for food purposes**

An theoretical study to determine the parameters of a boiling layer, depending on drying parameters for rational parameters of the drying process. Theoretical studies directed to reduce energy costs.

Одержано 25.09.11