

УДК 631.365.036.2

## Обґрунтування форми перерізу вакуумної сушильної камери з контактним нагрівом зерна

**Швидя В. О.**, к.т.н., Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства» НААН України

**Анеляк М. М.**, к.т.н., с.н.с, Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства» НААН України

**Степаненко С. П.**, к.т.н., с.н.с, Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства» НААН України

### Анотація

**Мета.** Зниження нерівномірності нагріву зерна нагрівальною поверхнею.

**Методи.** Використано теорію теплопровідності та термодинамічні методи, засновані на рівнянні теплопровідності та законі Стефана-Больцмана. Також використано метод планіметрії кривих.

**Результати.** Обґрунтовано для зниження нерівномірності нагріву зерна нагрівальною поверхнею використання сушильної камери, яка в поперечному перетині в нижній частині представляє собою сегмент кола, що накривається зверху параболічною поверхнею з фокусом, розміщеним на половині січної сегмента кола. Розроблені математичні залежності, які дають можливість визначити геометричні розміри поперечному

перерізу вакуумної сушильної камери з контактним нагрівом зерна.

**Висновки.** Зниження нерівномірності нагріву зерна контактним методом для сушіння його у вакуумі можна досягти, виконавши переріз сушильної камери в нижній частині подібно до циліндричної поверхні, яка представляє собою в перерізі сегмент кола, що накривається параболічною поверхнею з фокусом, розміщеним на половині січної сегмента кола. Геометричні розміри даного перерізу залежать від продуктивності сушарки, довжини сушильної камери та технологічних властивостей матеріалу, що задаються кутом тертя, густиною та насипною щільністю.

**Ключові слова:** зерно, циліндрична нагрівальна поверхня, параболічна поверхня, контактний нагрів, сушіння, сушильна камера, вакуумна сушарка.

UDC 631.365.036.2

## Justification of the shape of the section of a vacuum drying chamber with contact heating of grain

**Shvidia V.**, Ph.D., National Science Center «Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture»

**Anelyak M.**, Ph.D., National Science Center «Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture»

**Stepanenko S.**, Ph.D., National Science Center «Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture»

### Annotation

**Purpose.** Reduction of the uneven heating of the grain by the heating surface.

**Methods.** The theory of thermal conductivity and thermodynamic methods based on the heat

equation and the Stefan-Boltzmann law were used. The method of plan metric curves was also used.

**Results.** Justified to reduce the uneven heating of the grain by the heating surface, the use of a drying chamber, which in the cross section at the bottom is a segment of the circle, is covered from above by a parabolic surface with a focus located on the half of the

secant segment of the circle. The developed mathematical dependencies make it possible to determine the geometric dimensions of the cross section of a vacuum drying chamber with contact heating of the grain.

**Conclusions.** Reduction in the unevenness of grain heating by the contact method for grain drying in vacuum can be achieved by performing the section of the drying chamber in the lower part in the form of a cylindrical surface that is the segment of the circle in

the section that is covered by a parabolic surface with a focus located on the half of the secant segment of the circle. The geometric dimensions of this section depend on the capacity of the dryer, the length of the drying chamber and the technological properties of the material, which are set by the friction angle, density and bulk density.

**Keywords:** grain, cylindrical heating surface, parabolic surface, contact heating, drying, drying chamber, vacuum drier.

УДК 631.365.036.2

### Обоснование формы сечения вакуумной сушильной камеры с контактным нагревом зерна

**Швидя В. О.,** к.т.н., Национальный научный центр «Институт механизации и электрификации сельского хозяйства»

**Анеляк М. М.,** к.т.н., с.н.с., Национальный научный центр «Институт механизации и электрификации сельского хозяйства»

**Степаненко С. П.,** к.т.н., с.н.с., Национальный научный центр «Институт механизации и электрификации сельского хозяйства»

#### Аннотация

**Цель.** Снижение неравномерности нагрева зерна нагревающей поверхностью.

**Методы.** Использована теория теплопроводности и термодинамические методы, основанные на уравнении теплопроводности и законе Стефана-Больцмана. Также использован метод планиметрии кривых.

**Результаты.** Обосновано для снижения неравномерности нагрева зерна нагревающей поверхностью использование сушильной камеры, которая в поперечном сечении в нижней части представляет собой сегмент круга, накрывается сверху параболической поверхностью с фокусом, расположенным на половине секущей сегмента круга. Разработанные математические зависимости дают возможность определить геометрические размеры поперечного сечения вакуумной сушильной камеры с контактным нагревом зерна.

**Выводы.** Снижение неравномерности нагрева зерна контактным методом для сушки его в вакууме можно достичь, выполнив сечение сушильной камеры в нижней части в виде цилиндрической поверхности, которая представляет собой в сечении сегмент круга, что накрывается параболической поверхностью с фокусом, расположенным на половине секущей сегмента круга. Геометрические размеры данного сечения зависят от производительности сушилки, длины сушильной камеры и технологических

свойств материала, которые задаются углом трения, плотностью и насыпной плотностью.

**Ключевые слова:** зерно, цилиндрическая нагревающая поверхность, параболическая поверхность, контактный нагрев, сушка, сушильная камера, вакуумная сушилка.

**Постановка проблемы.** Однією з найбільш енерговитратних галузей сільськогосподарського виробництва є сушіння зерна. Великі витрати енергії пов'язані з необхідністю нагрівання зерна в процесі сушіння. Зазвичай у сучасних сушарках для нагрівання зерна використовують конвективний теплообмін між теплоносієм і зерном. Проте, даний спосіб теплопередачі потребує додаткових витрат енергії на рух теплоносія через зерно.

Одним із перспективних напрямків зниження енерговитрат під час сушіння є використання вакууму [1–3]. Водночас для інтенсифікації видалення вологи з внутрішніх шарів зернівки використовують його нагрівання [2]. Оскільки в процесі сушіння викачують повітря, найбільш ефективним способом нагріву зерна стає контактний (нагрів зерна випромінюванням потребує більше енергії).

Перевагою контактного нагріву є також те, що для нагріву зерна даний спосіб теплопередачі не потребує додаткових витрат енергії, на відміну від конвективного. Але нерівномірність нагріву зерна залежно від товщини шару є більшою у разі контактного нагріву, ніж у разі конвективного. Тому проблема зменшення нерівномірності нагріву зерна контактним способом у вакуумній сушильній камері є актуальною задачею.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У дослідженнях [4] було доведено, що в пристроях з контактним нагрівом 90% енерговитрат припадає на нагрів зерна та лише 10% – на переміщення та перемішування зерна, що є більш ефективним, ніж під час конвективного нагріву. Було рекомендовано застосовувати контактний нагрів для сушарок невеликої пропускної здатності, оскільки застосування контактного нагріву в сушарках великої пропускної здатності економічно недоцільне [5].

Автором [6] були розглянуті одномірні стаціонарні задачі теплопровідності, а також розроблена теорія теплопровідності плоскої, циліндричної та сферичної стінок, а також стінок з ребрами. У роботі [7] була розглянута динаміка нагріву зерна контактним методом, а також описано процес нагріву та сушіння зерна в циліндричній трубі. Авторами [8] була

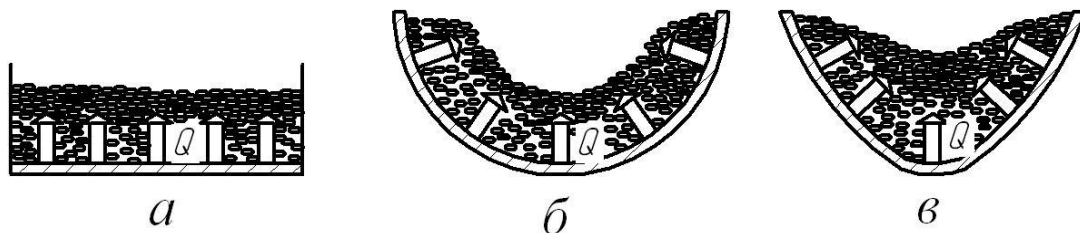
доведена енергоефективність сушіння зерна контактним методом у циліндричних трубах.

Але автори розглянутих досліджень присвячували увагу лише аналізу, а також підвищенню енергоефективності контактного нагріву та не розглядали способи зменшення нерівномірності нагріву зерна нагріваючими поверхнями. Тому дані дослідження важливі й актуальні.

**Мета досліджень.** Зниження нерівномірності нагріву зерна нагріваючою поверхнею.

**Методи досліджень.** Для обґрунтування форми перерізу вакуумної сушильної камери з контактним нагрівом зерна з метою зниження нерівномірності нагріву зерна нагріваючою поверхнею використовувалась теорія теплопровідності та термодинамічні методи, засновані на використанні рівняння теплопровідності [9] та закону теплового випромінювання Стефана-Больцмана для обміну випромінюванням між двома тілами через дзеркальну поверхню [10]. Для обґрунтування форми нагріваючої поверхні використовувались методи планіметрії кривих.

**Результати досліджень.** Контактний нагрів зерна може здійснюватися нагріваючими поверхнями з різною формою: як плоска пластина, частини циліндра та частини параболи тощо (рис. 1).



**Рис. 1.** Різні форми перерізу нагріваючої поверхні для контактного нагріву зерна:  
 а – плоска поверхня; б – циліндрична поверхня; в – параболічна поверхня  
**Fig. 1.** Different shapes of the section of the heating surface for contact heating of grain:  
 a – flat surface; б – cylindrical surface; в – parabolic surface

Процес передачі тепла від нагріваючої поверхні до зерна є складним фізичним процесом, який описується диференціальним рівнянням у частинних похідних [6]:

$$\rho c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} = q_V - \operatorname{div}[-\lambda \cdot \operatorname{grad}(t)] - \rho c_p \cdot v \cdot \operatorname{grad}(t) - \operatorname{div}(q_R) + \rho \chi \cdot \operatorname{grad}(W) \cdot \operatorname{grad}(h_1 - h_2), \quad (1)$$

де  $\rho$  – густина зерна,  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $c_p$  – питома теплоємність зерна,  $\text{Дж/кг } ^\circ\text{C}$ ;  
 $t$  – температура нагріву зерна,  $^\circ\text{C}$ ;  
 $\tau$  – час нагріву зерна,  $\text{с}$ ;  
 $q_V$  – об’ємний тепловий потік джерела тепла,  $\text{Вт/м}^3$ ;  
 $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності,  $\text{Вт/м } ^\circ\text{C}$ ;  
 $v$  – швидкість повітря,  $\text{м/с}$ ;  
 $q_R$  – тепловий потік випромінювання нагріваючої поверхні,  $\text{Вт/м}^2$ ;  
 $\chi$  – коефіцієнт дифузії,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  
 $W$  – вологість зерна, %;  
 $h_1, h_2$  – парціальні ентальпії абсолютно сухого зерна та води, відповідно,  $\text{Дж}$ .

Оскільки під час контактного нагріву зерно щільно прилягає до нагріваючої поверхні, то тепло, в основному, передається за рахунок теплопровідності, тому передачею тепла від нагріваючої поверхні конвекцією та випромінюванням знехтуємо. Для спрощення аналізу теплових процесів контактного нагріву зерна будемо вважати, що вся нагріваюча поверхня нагріта до температури  $t_p$  і вона незмінна з часом, тобто процес можна вважати стаціонарним.

Тоді, оскільки вся стінка нагріта до однакової температури, тепло розповсюджується в напрямку нормалі до нагріваючої поверхні, згідно з другим законом термодинаміки [11]. За такої умови температура

зерна поступово зменшується в напрямку по нормалі від нагріваючої поверхні.

З урахуванням вище згаданих припущень, проаналізувавши нагрів зернового шару тепловим потоком  $Q$  нагріваючими поверхнями різних форм на предмет рівномірності прогрівання (рис. 1), можна зробити висновок, що найкраща за рівномірністю прогрівання це – циліндрична поверхня (рис 1, б), тому що вона дає можливість рівномірно прогрівати зерно по довжині не тільки знизу, а й з боків, на відміну від нагріваючої поверхні у формі площини (рис 1, а), а також забезпечувати рівномірніший розподіл температур нагріву зерна по товщині, ніж нагріваюча поверхня, що виконана у формі параболи (рис 1, в).

Для сушіння зерна у вакуумі необхідний простір для продування та відведення водяної пари із зерна, тому весь переріз циліндричної поверхні не може бути заповнений зерном, лише – його частина. В умовах дії гравітації для того, щоб шар зерна щільно прилягав до циліндричної нагріваючої поверхні та не скочувався вниз по поверхні, доцільно розміщувати її вісь горизонтально, причому нахил стінок нагріваючої поверхні до горизонту не повинен перевищувати кута тертя  $\theta$ .

Скористаємося схемою (рис. 2), щоб визначити розміри горизонтальної циліндричної нагріваючої поверхні.

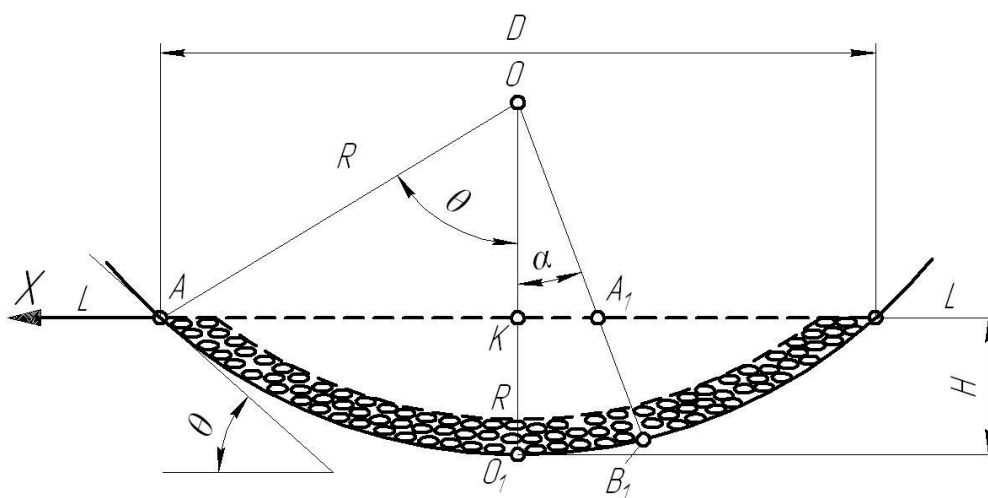


Рис. 2. Схема для визначення розмірів циліндричної нагріваючої поверхні  
 Fig. 2. Scheme for determining the dimensions of a cylindrical heating surface

Як видно з трикутника АОК (рис. 2), висота  $H$  і ширина  $D$  циліндричної нагріваючої поверхні дорівнюють:

$$H = R \cdot (1 - \cos \theta), \quad (2)$$

$$D = 2R \cdot \sin \theta, \quad (3)$$

де  $R$  – радіус циліндричної нагрівальної поверхні, м.

За визначеними розмірами  $R$ ,  $H$ ,  $D$  циліндричної нагрівальної поверхні зовнішня поверхня зернового шару в поперечному перетині описується лінією  $LL$ . У такому разі, за умови рівності температур всіх точок циліндричної нагрівальної поверхні, температура зовнішньої поверхні зернового шару теж однакова, нижча за температуру циліндричної нагрівальної поверхні.

Для покращення умов нагрівання зерна необхідно, щоб усі точки зернового шару мали температуру, яка наближена до  $t_{п}$  – температури нагріву циліндричної нагрівальної поверхні. Тому для цього необхідно, щоб зовнішня поверхня зернового шару була горизонтальною та співпадала з лінією  $LL$ . Тоді найнижча температура нагріву зерна  $t_0$  буде спостерігатися в точці  $K$ , поступово збільшуючись до  $t_{п}$  у точці  $A$ .

Визначимо, як змінюється температура нагріву зерна від точки  $K$  до точки  $A$ . Для цього направимо вісь  $X$  від точки  $K$  по лінії  $LL$ . Оскільки тепловий потік  $Q$  розповсюджується по нормалі до циліндричної нагрівальної поверхні, то, якщо розвернути дугу  $AO1$  у відрізок, процес передачі тепла можна звести до нагрівання плоскою поверхнею (рис. 1, б) зі змінною товщиною зернового шару.

Товщина зернового шару дорівнює довжині відрізка між циліндричною нагрівальною поверхнею та відрізком  $AK$ , який лежить на її радіусі. Для визначення зміни товщини зернового шару  $\delta$  залежно від координати  $x$  по відрізку  $AK$  проведемо відрізок  $OB1$  під довільним кутом  $\alpha$  (рис. 2). Тоді товщина зернового шару буде визначатись як довжина відрізка  $A1B1$  з трикутника  $KOA1$ :

$$\delta = R \cdot \left(1 - \frac{\cos \theta}{\cos \alpha}\right). \quad (4)$$

Визначивши кут  $\alpha$  із трикутника  $KOA1$  як арктангенс відношення  $\frac{x}{\cos \theta}$  та підставивши у формулу (4), одержимо:

$$\delta = R \cdot \left\{1 - \frac{\cos \theta}{\cos \left[\arctg \left(\frac{x}{R \cos \theta}\right)\right]}\right\}. \quad (5)$$

Зміну температури нагріву зерна від товщини шару можна знайти, використавши диференціальне рівняння (1). Оскільки під час нагріву дифузія вологи незначна, то її можна не враховувати:  $\text{grad}(W) = 0$ . Зважаючи на вище сказані припущення: неврахування передачі тепла конвекцією та випромінюванням ( $\text{div}(q_R) = 0$ ,  $v = 0$ ), а також те, що процес стаціонарний ( $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$ ) і циліндрична нагрівальна поверхня нагріта до температури  $t_{п}$  ( $q_V = 0$ ), диференціальне рівняння (1) можна записати:

$$-\text{div}[-\lambda \cdot \text{grad}(t)] = 0. \quad (6)$$

Оскільки тепло передається по нормалі до циліндричної нагрівальної поверхні, тобто враховується одна координата, розкриваючи дивергенцію, отримуємо:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial}{\partial h} \left(-\lambda \frac{\partial t}{\partial h}\right) &= 0 \Rightarrow \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial h^2} = \\ &= 0 \Rightarrow \frac{\partial^2 t}{\partial h^2} = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

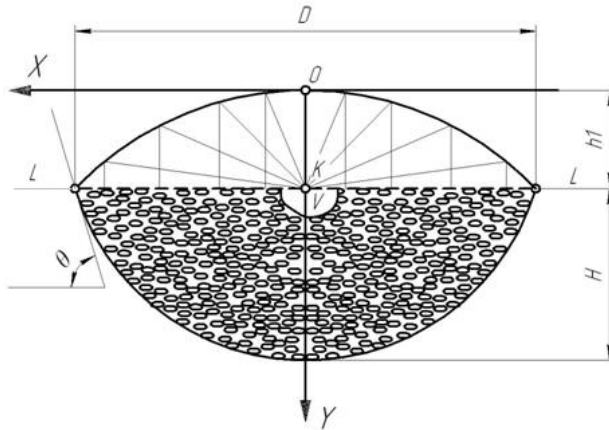
При граничних умовах:  $t(0) = t_{п}$ ,  $t(R \cdot \cos(\theta)) = t_0$ , рішення диференціального рівняння (7) прийме вид:

$$t(h) = \frac{h}{R \cdot (1 - \cos \theta)} \cdot (t_0 - t_{п}) + t_{п}. \quad (8)$$

Підставляючи замість  $h$  значення  $\delta$  за формулою (5), отримуємо залежність зміни температури на відрізку  $KL$  від координати  $x$ :

$$t(x) = \frac{\cos \left[\arctg \left(\frac{x}{R \cos \theta}\right)\right] - \cos \theta}{\cos \left[\arctg \left(\frac{x}{R \cos \theta}\right)\right] \cdot [1 - \cos \theta]} \cdot (t_0 - t_{п}) + t_{п}. \quad (9)$$

Для ще більшого вирівнювання температури нагріву по лінії  $LL$  можна використати теплове випромінювання нагрітого насіння. Для цього потрібно над циліндричною нагрівальною поверхнею розмістити дзеркальну параболічну поверхню, фокус якої буде розміщуватися в точці  $K$ , що дасть можливість концентрувати енергію теплового випромінювання зернового шару в точці з найнижчою температурою  $t_0$  (рис. 3.).



**Рис. 3.** Схема для визначення розмірів верхньої параболічної частини перерізу вакуумної сушильної камери з контактним нагрівом зерна

**Fig. 3.** Scheme for determining the dimensions of the upper parabolic section part vacuum drying chamber with contact heating of grain

Знаючи значення фокусу  $h1$  та координати двох точок:  $(0; 0)$ ,  $(R \sin \theta; h1)$ , підставляємо їх у рівняння параболи —  $y(x) = ax^2 + bx + c$  (рис. 3).

У результаті ми одержимо систему алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} c = 0 \\ a \cdot R^2 \cdot \sin(\theta)^2 + b \cdot R \cdot \sin \theta + c = h1. \end{cases} \quad (10)$$

Враховуючи, що фокус дорівнює:  $h1 = \frac{1}{4a}$ , та розв'язавши систему алгебраїчних рівнянь (10), знаходимо коефіцієнти рівняння параболи:  $a$ ,  $b$ ,  $c$ . Тоді рівняння, яке описує форму верхньої параболічної частини перерізу вакуумної сушильної камери з контактним нагрівом зерна в системі координат  $XU$  (рис. 3), буде мати вид:

$$y(x) = \frac{1}{4 \cdot h1} \cdot x^2 + \frac{4 \cdot h1^2 - R^2 \cdot \sin(\theta)^2}{4 \cdot h1 \cdot R \cdot \sin \theta} \cdot x. \quad (11)$$

У результаті концентрації теплового випромінювання в точці  $K$  її температура зростає від  $t_0$  до  $t_k$ . Згідно із законом Стефана-Больцмана [10] температура  $t_k$  повинна знаходитися в діапазоні  $[t_0; t_n]$ . Для її розрахунку скористаємося цим законом для масиву точок із температурою від  $t_0$  до  $t_n$ , які лежать на відрізку  $KL$ . Для  $i$ -тої точки з температурою  $t_i$  теплообмін випромінюванням з точкою  $K$  через дзеркальну поверхню за законом Стефана-Больцмана:

$$t_{cep} = 2 \cdot \frac{1}{R \cdot \sin \theta} \int_0^{R \cdot \sin \theta} \left[ \frac{\cos[\arctg(\frac{x}{R \cos \theta})] - \cos \theta}{\cos[\arctg(\frac{x}{R \cos \theta})] \cdot [1 - \cos \theta]} \cdot (t_0 - t_n) + t_n \right] dx. \quad (13)$$

Після алгебраїчних перетворень та інтегрування виразу (13) знайдемо значення середньої температури зовнішнього зернового шару  $LL$ :

$$Q_i = c_{пр} \cdot \alpha_{пог} \cdot n \cdot (t_i^4 - t_0^4), \quad (12)$$

де  $c_{пр}$  – приведений коефіцієнт випромінювання, Дж/С<sup>4</sup>;

$\alpha_{пог}$  – коефіцієнт поглинання;

$n$  – коефіцієнт відбивання.

Загальну теплову енергію випромінювання  $Q$  точки  $K$  можна знайти, підставивши у вираз (12) замість  $t_i$  формулу (9) і проінтегрувавши одержаний вираз по  $dx$ . Залежність температури від координати  $t(x)$  має нелінійний складний характер і  $t_i$  зводиться в четверту степінь у виразі (12), що призведе до того, що інтеграл виразу (12) буде громіздким. Для спрощення розрахуємо середню температуру масиву точок на відрізку  $LL$ . Для цього розрахуємо інтеграл [12]:

$$t_{\text{сер}} = \frac{ctg\theta}{1-\cos\theta} \cdot \left[ t_0 \cdot tg\theta - 2 \cdot t_{\text{п}} \cdot \sin\theta + t_{\text{п}} \cdot \cos\theta \cdot \ln\left(\frac{\sin\theta+1}{\cos\theta}\right) \right]. \quad (14)$$

Тоді загальна теплота, що передана точці  $K$  тепловим випромінюванням, згідно з формулою (12):

$$Q = c_{\text{пр}} \cdot \alpha_{\text{пог}} \cdot n \cdot (t_{\text{сер}}^4 - t_0^4). \quad (15)$$

Враховуючи, що теплота, яка розрахована за формулою (15), йде на нагрівання об'єму зерна  $V$  до температури  $t_K$ , можна записати:

$$c_{\text{пр}} \cdot \alpha_{\text{пог}} \cdot n \cdot (t_{\text{сер}}^4 - t_0^4) = c_p \cdot \rho \cdot V \cdot (t_K - t_0). \quad (16)$$

Звідки значення  $t_K$ :

$$t_K = t_0 + \frac{c_{\text{пр}} \cdot \alpha_{\text{пог}} \cdot n \cdot (t_{\text{сер}}^4 - t_0^4)}{c_p \cdot \rho \cdot V}. \quad (17)$$

Отже, розташування параболічної поверхні над нагрівальною циліндричною поверхнею дає можливість зменшити різницю температур між точкою  $K$  та циліндричною нагрівальною поверхнею, сприяючи підвищенню рівномірності нагріву зерна.

Радіус циліндричної нагрівальної поверхні  $R$  залежить від продуктивності вакуумної сушарки з контактним нагрівом зерна  $N_{\text{суш}}$ . Продуктивність вакуумної сушарки з контактним нагрівом зерна  $N_{\text{суш}}$  можна представити як відношення маси зерна, що сушиться, до експозиції сушіння  $\tau_{\text{екс}}$ . Визначаючи масу зерна через добуток об'єму на насипну щільність зерна, а об'єм як добуток довжини сушильної камери на площу сегменту, що обмежується лінією  $LL$  (рис. 1), одержимо вираз для розрахунку продуктивності вакуумної сушарки з контактним нагрівом зерна:

$$N_{\text{суш}} = \frac{\frac{R^2}{2} \cdot \left(\frac{\pi\theta}{90^\circ} \sin 2\theta\right) \cdot L \cdot \rho_{\text{нас}}}{\tau_{\text{екс}}}, \quad (18)$$

де  $L$  — довжина сушильної камери, м;

$\rho_{\text{нас}}$  — насипна щільність зерна, кг/м<sup>3</sup>.

Виражаючи з формули (18) радіус циліндричної нагрівальної поверхні, знаходимо його залежність від продуктивності вакуумної сушарки з контактним нагрівом зерна:

$$R = \sqrt{\frac{2N_{\text{суш}}\tau_{\text{екс}}}{\rho_{\text{нас}} \cdot L \cdot \left(\frac{\pi\theta}{90^\circ} \sin 2\theta\right)}}. \quad (19)$$

Для покращення сушіння зерна у вакуумній камері з контактним нагрівом зерна необхідно по довжині сушильної камери встановити елементи конструкції, які забезпечать перемішування зерна під час руху вздовж сушильної камери. Подальші наукові дослідження з експозиції сушіння та нагріву зерна у вакуумі допоможуть уточнити параметри сушильної камери вакуумної сушарки з контактним нагрівом зерна.

## Висновки

Зниження нерівномірності нагріву зерна контактним методом для сушіння його у вакуумі можна досягти, виконавши переріз сушильної камери в нижній частині подібно до циліндричної поверхні, яка представляє собою в перерізі сегмент кола, що накривається параболічною поверхнею з фокусом, розміщеним на половині січної сегмента кола. Геометричні розміри даного перерізу залежать від продуктивності сушарки, довжини сушильної камери та технологічних властивостей матеріалу, що задається кутом тертя, густиною та насипною щільністю.

## Бібліографія

1. Семенов В. Г., Буданцев Е. В., Булкин М. С. Качество и энергозатраты в процессах вакуумного обезвоживания термолabileльных материалов. *Известия Вузов. Пищевая технология*. 2011. № 1. С. 65–67.

2. Некоторые особенности термовакuumной сушки / Н. П. Дикий, А. М. Егоров, В. А. Кутовой [и др.]. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники (16)*. 2007. № 4. С. 53–57.

3. Super vacuum belt dryer. *Hisaka Works, Ltd. 4,4 Chome, Hiranomachi. Higashi-Ku. Osaka 541*. Japan, 1997.

4. Павлушин А. А. Механико-технологическое обоснование и разработка энергосберегающих средств механизации тепловой обработки зерна: дис. ... д-ра техн. наук. Ульяновск, 2014. 554 с.

5. Муругов В. П. Использование установок инфракрасного нагрева в сельскохозяйственном производстве. *Применение электрической энергии в сельскохозяйственном производстве*. Москва, 1974. С. 529–534.

6. Солодов А. П. Электронный курс «Тепломассообмен в энергетических установках: инженерные методы расчета»: учебное пособие по курсам «Тепломассообмен», «Тепломассообмен в оборудовании АЭС». Москва, 2015. 124 с.

7. Тепловая обработка зерна в установках контактного типа: монография / В. И. Курдюмов, А. А. Павлушин, Г. В. Карпенко, С. А. Сутягин. Ульяновск, 2013. 290 с.

8. О возможности снижения энергозатрат в установках контактного типа для сушки зерна / В. И. Курдюмов, А. А. Павлушин, Г. В. Карпенко, С. А. Сутягин. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2011. № 11 (85). С. 101–106.

9. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. Москва, 1977. 735 с.

10. Теплообмен излучением между телами, разделенными прозрачной средой. URL: [https://studopedia.ru/8\\_163494\\_teploobmen-izlucheniem-mezhdu-telami-razdelennimi-prozrachnoy-sredoy.html](https://studopedia.ru/8_163494_teploobmen-izlucheniem-mezhdu-telami-razdelennimi-prozrachnoy-sredoy.html) (дата обращения: 25.04.2018).

11. Ehrenfest-Afanassjewa T. Die Grundlagen der Thermodynamik. E. J. Brill, 1956. 131 p.

12. Кожухов И. Б., Прокофьев А. А. Справочник по математике. Москва, 1999. 640 с.

### Bibliografija

1. Semenov V. G., Budantsev Ye. V., Bulkin M. S. Kachestvo i energozatraty v protsessakh vakuumnogo obezvozhivaniya termolabil'nykh materialov. *Izvestiya Vuzov Pishchevaya tekhnologiya*. 2011. № 1. S. 65–67.

2. Nekotoryye osobennosti termovakuumnoy sushki / N. P. Dikiy, A. M. Yegorov, V. A. Kutovoy [i

dr.]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Vakuum, chistyye materialy, sverkhprovodniki (16)*. 2007. № 4. S. 53–57.

3. Super vacuum belt dryer. *Hisaka Works, Ltd. 4,4 Chome, Hiranomachi. Higashi-Ku. Osaka 541*. Japan, 1997.

4. Pavlushin A. A. Mekhaniko-tekhnologicheskoye obosnovaniye i razrabotka energosberegayushchikh sredstv mekhanizatsii teplovoy obrabotki zerna: dis. ... d-ra tekhn. nauk. Ul'yanovsk, 2014. 554 s.

5. Murugov V. P. Ispol'zovaniye ustanovok infrakrasnogo nagreva v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve. *Primeneniye elektricheskoy energii v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve*. Moskva, 1974. S. 529–534.

6. Solodov A. P. Elektronnyy kurs «Teplomassoobmen v energeticheskikh ustanovkakh: Inzhenernyye metody rascheta»: uchebnoye posobiye po kursam «Teplomassoobmen», «Teplomassoobmen v oborudovanii AES», Moskva, 2015. 124 s.

7. Teplovaya obrabotka zerna v ustanovkakh kontaktnogo tipa: monografiya / V. I. Kurdyumov, A. A. Pavlushin, G. V. Karpenko, S. A. Sutyagin. Ul'yanovsk, 2013. 290 s.

8. O vozmozhnosti snizheniya yenergozatrata v ustanovkakh kontaktnogo tipa dlya sushki zerna / V. I. Kurdyumov, A. A. Pavlushin, G. V. Karpenko, S. A. Sutyagin. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2011. № 11 (85). S. 101–106.

9. Tikhonov A. N., Samarskiy A. A. Uravneniya matematicheskoy fiziki. Moskva, 1977. 735 s.

10. Teploobmen izlucheniym mezhdu telami, razdelennymi prozrachnoy sredoy. URL: [https://studopedia.ru/8\\_163494\\_teploobmen-izlucheniem-mezhdu-telami-razdelennimi-prozrachnoy-sredoy.html](https://studopedia.ru/8_163494_teploobmen-izlucheniem-mezhdu-telami-razdelennimi-prozrachnoy-sredoy.html) (data zvernennya: 25.04.2018).

11. Ehrenfest-Afanassjewa T. Die Grundlagen der Thermodynamik. E. J. Brill, 1956. 131 p.

12. Kozhukhov I. B., Prokof'ev A. A. Spravochnik po matematike. Moskva, 1999. 640 s.

### Bibliography

1. Semenov V., Budantsev E, Bulkin M. Quality and energy costs in the processes of vacuum dewatering of thermolabile materials. *Izvestiya Vuzov Food technology*. 2011. № 1. P. 65–67.

2. Some features of thermo vacuum drying / N. Dikiy, A. Egorov, V. Kutovoy [and others]. *Questions of atomic science and technology. Series: Vacuum, pure materials, superconductors (16)*. 2007. № 4. P. 53–57.



3. Super vacuum belt dryer. *Hisaka Works, Ltd. 4.4 Chome, Hiranomachi. Higashi-Ku. Osaka 541.* Japan, 1997.
4. Pavlushin A. Mechanic-technological rationale and development of energy-saving means of mechanization of heat treatment of grain: dis. ... Dr. techn. sciences. Ulyanovsk, 2014. 554 p.
5. Murugov V. Use of infrared heating in agricultural production. *Application of electric energy in agricultural production.* Moscow, 1974. P. 529–534.
6. Solodov A. Electronic course «Heat and Mass Transfer in Power Plants: Engineering Methods of Calculation»: a training manual on the courses «Heat and Mass Transfer», «Heat and Mass Transfer in Nuclear Power Plant Equipment». Moscow, 2015. 124 p.
7. Thermal processing of grain in installations of contact type: monograph / V. Kurdyumov, A. Pavlushin, G. Karpenko, S. Sutyagin. Ulyanovsk, 2013. 290 p.
8. On the possibility of reducing energy costs in contact-type installations for grain drying / V. Kurdyumov, A. Pavlushin, G. Karpenko, S. Sutyagin. *Bulletin of the Altai State Agrarian University.* 2011. No. 11 (85). P. 101–106.
9. Tikhonov A., Samarskii A. Equations of mathematical physics. Moscow, 1977. 735 p.
10. Heat exchange by radiation between bodies separated by a transparent medium. URL: [https://studopedia.ru/8\\_163494\\_teploobmen-izlucheniem-mezhdu-telami-razdeleennimi-prozrachnoy-sredoy.html](https://studopedia.ru/8_163494_teploobmen-izlucheniem-mezhdu-telami-razdeleennimi-prozrachnoy-sredoy.html) (date of the beast: 25.04.2018).
11. Ehrenfest-Afanassjewa T. *Die Grundlagen der Thermodynamik.* E. J. Brill, 1956. 131 p.
12. Kozhukhov I., Prokofiev A. *Handbook of Mathematics.* Moscow, 1999. 640 p.