

## Список использованных источников

1. Национальная стратегия по обращению с твердыми коммунальными отходами и вторичными материальными ресурсами в Республике Беларусь на период до 2035 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.government.by/upload/docs/filea1a9a20a06fc7fe5.PDF>. – Дата доступа: 15.11.2020.
2. Буркин, А. Н. Переработка твердых отходов обувных предприятий г. Витебска / А. Н. Буркин, К. С. Матвеев, В. К. Смелков. – Витебск: УО "ВГТУ", 2000. – 118 с.
3. Обувные материалы из отходов пенополиуретанов / А. Н. Буркин [и др.]; – Витебск: УО "ВГТУ", 2001. – 173 с.
4. Радюк А.Н. Анализ методов переработки отходов обувных пенополиуретанов / А.Н. Радюк // Хімічні проблеми сьогодення: матеріали I Міжнародної (XI Українська) наукової конференції – Вінниця: ТОВ «Нілан-ЛТД», 2016. – С. 200.

УДК 664.723:620.9

**А.Ж. Сагындикова**

Алматинский университет энергетики и связи  
имени Гумарбека Даукеева

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ ИНДУКЦИОННЫЙ МЕТОД СУШКИ ЗЕРНА

**Аннотация.** В статье излагается теория движения зерна по геликоидному винту, являющемуся основным рабочим органом аппарата индукционной высокочастотной сушки зерна. Нами предлагается высокочастотная индукционная сушка, имеющая такие преимущества перед традиционными, как направленность основной энергии не на нагрев материала зерна, а целенаправленно на внутреннюю влагу, находящуюся в зерне, что обусловлено различной диэлектрической проницаемостью двух сред – влаги и материалов самого зерна. При индивидуальной сушке влага в зерне нагревается и испаряется, за счет этого снижается влажность зерна в данный момент и пропорционально этому снижается коэффициент трения. Когда коэффициент трения достигнет величины больше  $\operatorname{tg}$  угла наклона геликоида, зерно снова начинает двигаться вниз и процесс повторяется.

## Введение

Казахстан является одним из значимых производителей твердой и сильной пшеницы. Сейчас урожай зерна в Казахстане достигает 20 млн. тонн, а в лучшие годы собирали до 34 млн. тонн. Значительная часть этого зерна экспортируется в разные страны мира. Учитывая, что основные зернопроизводящие регионы находятся в северной части республики уборка сопряжена с такой проблемой как выпадение дождей и зерно убирается с повышенной влажностью, доходящей до 20%.

При обмолоте влажных хлебов обычно в конце августа или в начале сентября влажность соломы превышает влажность зерна на 10-20%, а при уборке риса разность влажности зерна и стеблей бывает даже трехкратная (рис. 1).

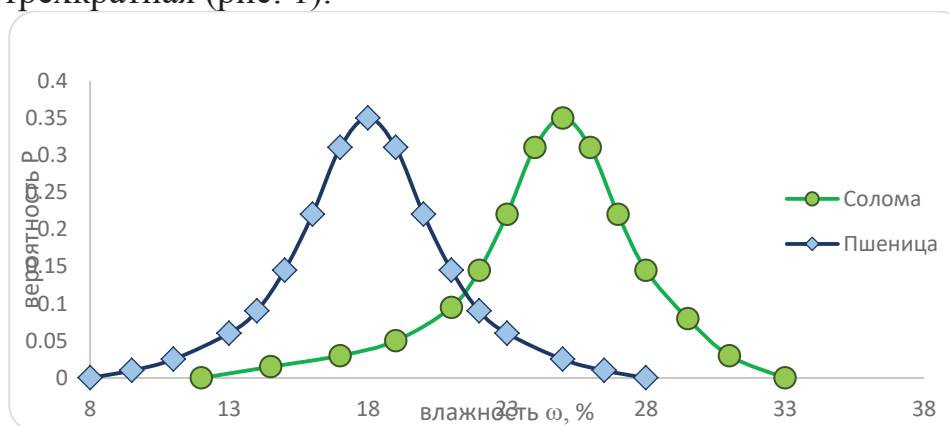


Рис. 1 - Зависимость влажности зерна и соломы

В этой связи, зерно, убираемое в северном Казахстане, или рис в Кызыл- Ординской области для сохранности необходимо сушить.

Нами предлагается высокочастотная индукционная сушка, имеющая такие преимущества перед традиционными, как направленность основной энергии не на нагрев материала зерна, а целенаправленно на внутреннюю влагу, находящуюся в зерне, что обусловлено различной диэлектрической проницаемостью двух сред – влаги и материалов самого зерна. Благодаря этому к.п.д. такой сушильной камеры превышает традиционные, а кроме того, не наносятся термические травмы эндосперме зерна.

Технологическая схема такой зерносушилки показана на рис. 2. Она содержит высокочастотный генератор, возбуждающую обмотку, которая огибает цилиндр, выполненного из диэлектрика.

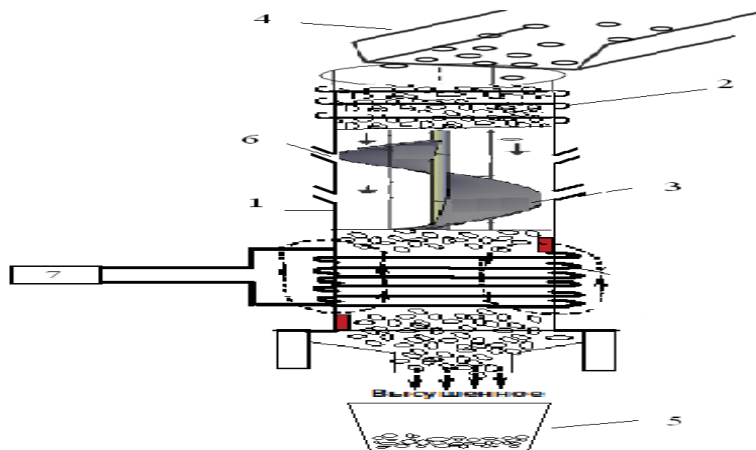


Рис. 2 - Технологическая схема зерносушилки

Внутри этого цилиндра находится неподвижная винтовая поверхность, на которую с верхней части засыпается зерно из бункера. За счет гравитационных сил зерно движется вниз по винтовой поверхности. Здесь имеется одна особенность – винтовая поверхность должна иметь переменный шаг, уменьшающийся от верхней части к нижней. Это вызвано тем, что по мере высушивания зерна снижается коэффициент трения зерна по материалу винтовой поверхности. Вообще коэффициент трения зерна по материалу вначале возрастает с увеличением влажности, т.к. присутствует эффект адгезии. Затем при достижении определенной влажности начинается снижаться, т.к. влага образует смазывающую пленку между зерном и материалом поверхности, (рис.3), при дальнейшем возрастании влажности такая смешанная среда, зерно и влага переходит в квазижидкое состояние и коэффициент трения резко падает, рис. 3.

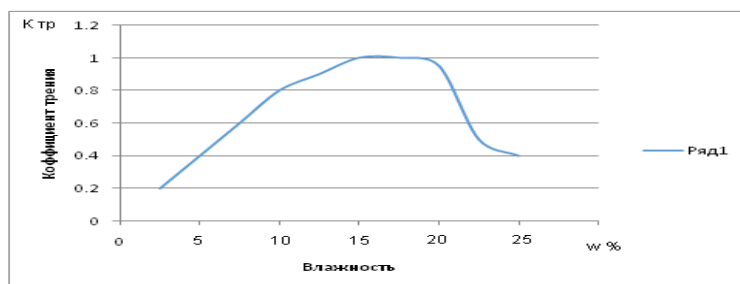


Рис. 3 - Зависимость коэффициента трения зерна от влажности

Мы видим из рисунка 3, что на участке реальной влажности зерна (5-25%), эта зависимость носит линейный характер и имеет следующий вид

$$K_{тр} = 0,010W + 0,331 \quad (1)$$

Начальная скорость зерна при соприкосновении с винтовой поверхностью определяется из простейшего уравнения свободного падения

$$V_0 = \sqrt{2gh_0} \quad (2)$$

Где  $h_0$  - расстояние от выходной части загрузного бункера до горизонтальной плоскости сечения винтовой поверхности (рис. 3).

В формуле 1 сопротивлением воздуха пренебрегаем, т.к. скорость истечения зерна мала.

Зерно, попав на винтовую поверхность, не должно сразу сползать вниз по этой поверхности, т.к. коэффициент трения  $K_{P_{t0}} > L_{i0}$  больше угла подъема винтовой поверхности. Только лишь после нагрева влаги в зерне и частичного снижения влажности, коэффициент трения начнет снижаться и зерно движется вниз, но затем остановится, т.к. в этой части  $K_{P_{t0}} > L_{i1}$  и т.д., до тех пор пока зерно не достигнет требуемой влажности.

При индивидуальной сушке влага в зерне нагревается и испаряется, за счет этого снижается влажность зерна в данный момент и пропорционально этому снижается коэффициент трения. Когда коэффициент трения достигнет величины больше  $\text{tg}$  угла наклона геликоида, зерно снова начинает двигаться вниз и процесс повторяется.

Скорость движения зерна в вертикальной плоскости не должна быть очень малой, рис. 4, т.к. в противном случае происходит перегрев зерна (из-за закипания воды в зерновке), но и не должна быть большой, рассмотрено в [1], авторы рекомендуют сушку ВЧ токами не более 2 минут (120сек), в противном случае снизиться всхожесть зерна. При этом, сокращается время экспозиции магнитно-электрического поля на зерно, и оно выйдет недостаточно просушенным.

При таких условиях пространственным движением зерна, когда возникает центробежная сила, прижимающая зерно к стенке кожуха, можно пренебречь. Соответственно, пренебрегаем кориолисовым ускорением. Задача сводится к нахождению образующей винтовой поверхности, спроецированной на плоскости X-Y.

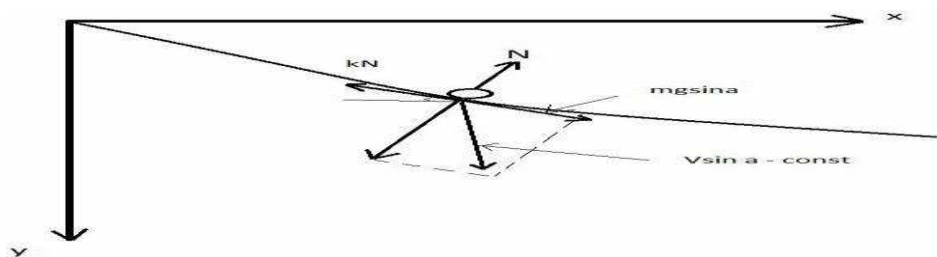


Рис. 4 - Силы действующие на зерно, движущиеся по обмоткам винта

Задаемся условием постоянства скорости движения зерна по образующей винтовой линии, т.е.

$$V=V_0=\text{const} \quad (3)$$

И требуется определить форму этой образующей.

Уравнение (2) примет вид:

$$m \frac{dV}{dt} = mg \sin \alpha - kN = 0 \quad (4)$$

Подставляя уравнение (3) в (5) имеем:

$$(5) \quad mg \sin \alpha - kmg \cos \alpha + km \frac{V_0^2}{\rho} = 0;$$

Учитывая, что

$$\sin \alpha = \frac{dy}{d,s}; \quad \cos \alpha = \frac{dx}{d,s}; \quad \rho = \frac{d,s}{d\alpha};$$

$d\alpha = \frac{y'' dx}{1+y'^2}$ , то уравнение (5) изменят вид:

$$y(y'' - k) + kV_0^2 \frac{y''}{1+y'^2} = 0 \quad (6)$$

Таким образом получим дифференциальное уравнение 2-го порядка образующей винтовой поверхности, по которой зерно, высыхая, двигалось бы с постоянной скоростью.

$$y'' - \frac{g}{kV_0^2} (y' - k) (1 + y'^2) = 0; \quad (7)$$

Для решения этого уравнения введем подстановку

$$y' = q \quad (8)$$

и уравнение (7) примет вид:

$$\frac{dq}{dx} = \frac{g}{kV_0^2} (q - k) (1 + q^2); \quad (9)$$

или 
$$dx = \frac{kV_0^2 dq}{g(q-k)(1+q^2)}; \quad (10)$$

Интегрируя имеем:

$$\int dx = h_0 \int \frac{dq}{(1+q^2)(bq-1)} \quad (11)$$

где:  $a = h_0 = \frac{V_0^2}{g}$  - расстояние от бункера с зерном до горловины сушилки;

$$b = \frac{1}{k}. \quad (12)$$

Для интегрирования (12) разложим дробь на два элемента:

$$\frac{1}{(1+q^2)(bq-1)} = \frac{Aq+B}{1+q^2} + \frac{C}{bq-1} \quad (13)$$

Упрощая имеем:

$$Abq^2 - Aq + Bbq + C + Cq^2 = 1;$$

Приравнявая коэффициенты при равных степенях приходим к выражениям:

$$A = \frac{-b}{1+b^2}; \quad B = -\frac{1}{1+b^2}; \quad C = \frac{b^2}{1+b^2}.$$

Подставив в уравнение (12) мы получим:

$$x = a \frac{-b}{1+b^2} \int \frac{q dq}{1+q^2} - \frac{a}{1+b^2} \int \frac{dq}{1+q^2} + \frac{ab^2}{1+b^2} \int \frac{dq}{bq-1} + C_1 \quad (14)$$

где  $C_1$  – постоянная, определяемая из граничных условий [3].

Проинтегрировав уравнение (14) по частям:

$$x = \frac{ab}{1+b^2} \ln \frac{bq-1}{\sqrt{1+q^2}} - \frac{a}{1+b^2} \operatorname{arctg} q + C_1 \quad (15)$$

Постоянная  $C_1$  определяется из наглядных условий при  $x=0$ ;  $q_0 = y' = V_0$ ;

Отсюда:

$$C_1 = \frac{a}{1+b^2} \operatorname{arctg} q_0 - \frac{ab}{1+b^2} \ln \frac{bq_0-1}{\sqrt{1+q_0^2}}$$

Уравнение (15) преобразуется в вид:

$$x = \frac{ab}{1+b^2} \ln \left[ \frac{(bq-1)\sqrt{1+V_0^2}}{(bV_0-1)\sqrt{1+q^2}} \right] + \frac{a}{1+b^2} (\operatorname{arctg} V_0 - \operatorname{arctg} q) \quad (16)$$

Для определения второй декартовой координаты  $y$ , обратимся к выражению:

$$\frac{dy}{dx} = q, \text{ подставив значение } x \text{ из (16)}$$

получим

$$dy = \frac{aq dq}{(1+q^2)(bq-1)} \quad (17)$$

Разложив дробь на элементы, имеем:

$$dy = \frac{a}{1+b^2} \left( -\frac{q}{1+q^2} + \frac{b}{1+q^2} + \frac{b}{bq-1} \right) dq,$$

Проинтегрировав, получим:

$$y = \frac{a}{1+b^2} \left( \ln \frac{bq-1}{\sqrt{1+q^2}} + b \operatorname{arctg} q \right) + C_2; \quad (18)$$

Постоянная  $C_2$  определится из граничных условий при  $q=q_0 = V_0$  и  $y=0$

$$C_2 = -\frac{a}{1+b^2} \left( \ln \frac{bV_0-1}{\sqrt{1+V_0^2}} + b \operatorname{arctg} V_0 \right)$$

И уравнение (18) примет вид

$$y = \frac{a}{1+b^2} \left[ \ln \left( \frac{(bq-1)\sqrt{1+V_0^2}}{(bV_0-1)\sqrt{1+q^2}} \right) + b(\operatorname{arctg} q - \operatorname{arctg} V_0) \right] \quad (19)$$

Для образующей винта более удобно рассматривать ее в полярных координатах

$$\rho = \sqrt{y^2 + x^2} =$$

$$\sqrt{\left[ \frac{a}{1+b^2} \ln \left[ \frac{(bq-1)\sqrt{1+V_0^2}}{(bV_0-1)\sqrt{1+q^2}} \right] + \frac{a}{a+b^2} \{ \operatorname{arctg} V_0 - \operatorname{arctg} q \} \right]^2 + \left[ \frac{a}{a+b^2} \left\{ \ln \left( \frac{(bq-1)\sqrt{1+V_0^2}}{\sqrt{1+q^2}(bV_0-1)} \right) \right\} + b(\operatorname{arctg} q - \operatorname{arctg} V_0) \right]^2} \quad (20)$$

Учитывая наше условие, что:

$$y' = q = \operatorname{tg} \alpha = k_{\text{тр}} k_w \approx 0.1w \quad (21)$$

а также, что

$$b = \frac{1}{0.1w} u \quad a = h_0 = \frac{V_0^2}{g} \quad (22)$$

мы получим окончательную зависимость, определяющую форму образующей винтовой поверхности в зависимости от влажности зерна и расстояния от бункера до горловины сушилки.

$$\rho = \sqrt{\left\{ \frac{ab}{1+b^2} \ln \left[ \frac{(bq-1)\sqrt{1+V_0^2}}{(bV_0-1)\sqrt{1+q^2}} \right] + \frac{a}{1+b^2} [\operatorname{arctg} V_0 - \operatorname{arctg} q] \right\}^2 + \left\{ \frac{a}{1+b^2} \left[ \ln \left[ \frac{(bq-1)\sqrt{1+V_0^2}}{\sqrt{1+q^2}(bV_0-1)} \right] \right] + b(\operatorname{arctg} q - \operatorname{arctg} V_0) \right\}^2} \quad (23)$$

После упрощения приходим к окончательной функции, описывающей искомую образующую в полярных координатах

$$\rho = \frac{V_0^2}{g} \sqrt{\left( \frac{1}{1 + \left( \frac{1}{0.01W + 0.33} \right)^2} \right) \left[ \ln \left( \frac{\left( \frac{\operatorname{tg} \alpha}{0.01W + 0.33} - 1 \right) \sqrt{1+V_0^2}}{\sqrt{1 + \operatorname{tg} \alpha} \left( \frac{V_0}{0.01W + 0.33} - 1 \right)} \right)^2 \right] + (\operatorname{arctg} V_0 - \alpha)^2, \quad (24)$$

Для инженерной интерпретации уравнения 24, авторами просчитывалась эта функция на программе Excel и здесь наглядно видно каким образом изменяются угол наклона образующей геликоида и его полярный радиус в зависимости от влажности в данный момент при движении по геликоиду внутри излучателя СВЧ сушки. По существу, мы видим, что этот винт имеет технологически осуществимые параметры как по углу винтовой линии, так и по полярному радиусу.

Таким образом, мы получили уравнение образующей геликоида с переменным шагом в зависимости от начальной скорости падающего зерна  $V_0$  и влажности зерна  $W$  в каждый момент движения по кривой  $f(\rho, \alpha)$ , где  $\rho$  и  $\alpha$  изменяются в зависимости от коэффициента трения зерна как функции его влажности, рис. 5.

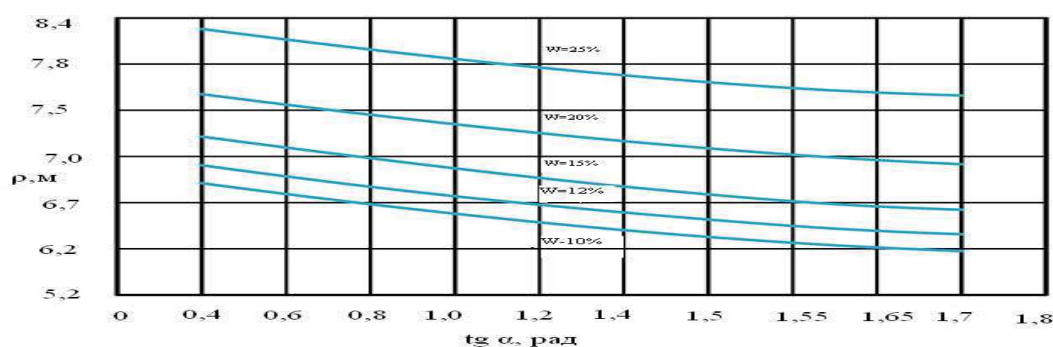


Рис. 5 - Зависимость коэффициента трения зерна

**Заключение.** Таким образом, в данной статье впервые обосновано саморегулирующееся движение зерна по винтовой поверхности с переменным шагом при СВЧ сушки зерна.

#### Список использованных источников

1. Mohamed Hemisatal, журнал «BiosystemsEngineering» №112, 2012 стр.202-209, (journalhomepage: [www.elsevier.com/locate/issn/15375110](http://www.elsevier.com/locate/issn/15375110)).
2. Будников, Д.А. Интенсификация сушки зерна активным вентилированием с использованием электромагнитного поля СВЧ: Автореф. дис.канд.тех.наук : 05.20.02 / Д. А. Будников. – зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2007. – 16с.
3. Курушин, А. А., Пластиков, А.Н. Проектирование СВЧ устройств в среде CST MicrowaveStudio / А. А. Курушин, А.Н. Пластиков, – М.: Издательство МЭИ, 2010. – 160 с.
4. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория переноса энергии и вещества. – Минск: Изд-во Акад. Наук БССР, 1954. – 357с.