

УДК 664.72.004:504

**C. Н. Петушенко**

Одесский технический колледж ОНАПТ, ул. Балковская, 54, Одесса, 65001

## **РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ПЕРВИЧНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ ЗЕРНА МЕЛКОСЕМЕННЫХ КУЛЬТУР**

*Приведены результаты экспериментальных исследований процессов теплообмена при продувании зерна холодным воздухом. Получены обобщающие уравнения для рапса*

**Ключевые слова:** теплообмен, рапс, обобщающие уравнение

## **РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ ПРИ ПЕРВІЧНІЙ ХОЛОДИЛЬНІЙ ОБРОБЦІ ЗЕРНА ДРІБНОНАСІННЄВИХ КУЛЬТУР**

*Наведено результати експериментальних досліджень процесів теплообміну при продуванні зерна холодним повітрям. Отримано узагальнюючі рівняння для ріпаку*

**Ключові слова:** теплообмін, ріпак, узагальнюючі рівняння

## **RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF HEAT TRANSFER PROCESS AT REFRIGERATOR WHEN THE PRIMARY REFRIGERATION PROCESSING OF GRAIN OF SMALL-SEEDED CROPS**

*The results of experimental studies of heat exchange by blowing grains to cold air. Obtained by generalizing the equation for rape*

**Keywords:** heat transfer, rape, generalizing equation

### **I. ВВЕДЕНИЕ**

Актуальность использования искусственного холода при первичной обработки и хранении зерна на входе определяется следующими факторами [1].

Во-первых, разработка охлаждающих комплексов позволит осуществлять холодильную обработку сельскохозяйственного сырья непосредственно в местах его заготовок и способствует повышению качества и продолжительности сроков хранения.

Во-вторых, метод охлаждения зерна позволяет хранить зерно и семена масличных культур с повышенной влажностью на протяжении длительного времени.

В-третьих, кроме того, что метод сохраняет качество зерна, он является экологически чистым – традиционная в странах СНГ сушка, как правило, проводится смесью топочных газов и воздуха, что вызывает загрязнение канцерогенными веществами.

В-четвертых, предотвращение потерь объема и качества вследствие жизнедеятельности насекомых возможно эффективно избежать при охлаждении урожая до температуры ниже 13 °C.

В-пятых, реализация профилактики роста плесневых грибов.

В-шестых, удается избежать дорогой и вредящей окружающей среде химической обработки зерна.

В-седьмых, отсутствие потерь при перескладировании.

В-восьмых, минимизация потерь вследствие дыхания зерна.

Следует отметить, что среди всех типов зерновых продуктов особый интерес для низкотемпературной сушки представляют сорта мелкого зерна (рапс, лен, просо, горчица, амарант и др.). Они из-за незначительного характерного линейного размера наиболее подвержены повреждению при сушке нагревом.

В настоящее время отсутствуют какие-либо данные по кинетике охлаждения зерна и процессов тепломассообмена в этих условиях.

Целью данной работы является изучение особенностей режимов тепловлажностной обработки зерновых продуктов в широком диапазоне температур и влагосодержания потока воздуха, как агента низкотемпературной сушки.

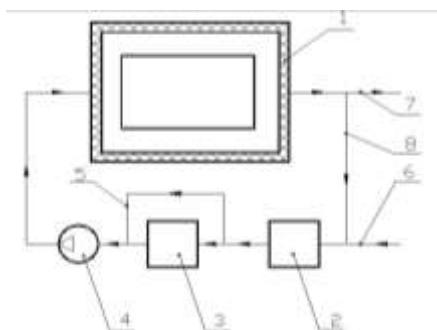
### **II. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Среди всех типов зерновых продуктов особый интерес для низкотемпературной сушки представляют сорта мелкого зерна (рапс, лен, просо, горчица, амарант и др.). Они из-за незначительного характерного линейного размера наиболее подвержены повреждению при сушке нагревом.

В настоящее время отсутствуют какие-либо данные по кинетике охлаждения зерна и процессов тепломассообмена в этих условиях.

Целью данной работы является изучение особенностей режимов тепловлажностной обработки зерновых продуктов в широком диапазоне темпе-

ратур и влагосодержаний потока воздуха, как агента низкотемпературной сушки.



**Рисунок 1 – Схема стенда для исследования режимов низкотемпературной обработки зерна мелкосеменных культур.**

С целью сокращения количества опытов, повышения достоверности полученных результатов и упрощения их обработки, наиболее целесообразно применение методов планирования многофакторных экспериментов и соответствующих программ для обработки и статистического анализа результатов.

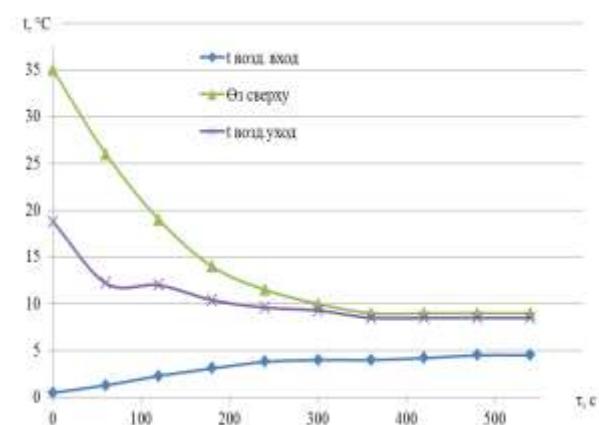
В процессе проведения экспериментальных исследований для определения скоростей и расхода воздуха микроманометр ММН и дифференциальная трубка Пито.

Температура воздуха и зерна определялась с помощью термометров сопротивления и электронного блока.

Относительная влажность воздуха определялась с помощью психрометра Ассмана.

Количество уносимой влаги из зерна весовым способом с помощью электронных лабораторных весов. Начальная и конечная влажность зерна определялась в лабораторных условиях на приборе СЕШ-3М.

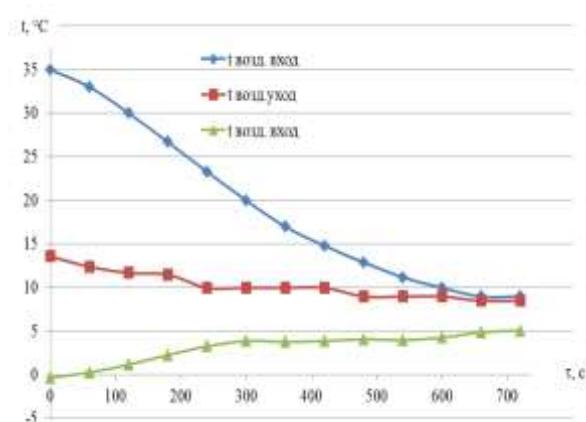
Были проведены экспериментальные исследования кинетики охлаждения мелкосеменных культур от режимов охлаждения – семян рапса и проса.



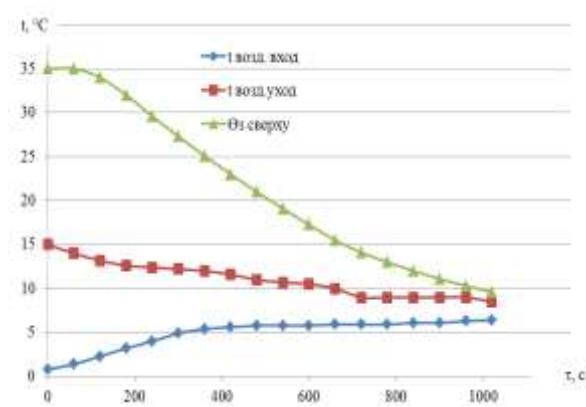
**Рисунок 2 – Изменение температур воздуха на входе и выходе из слоя и температуры зерна в слое высотой 100 мм**

Для проведения экспериментальных исследований был изготовлен стенд, представленный на рисунке 1.

- 1 – сушильная камера;
- 2 – охладитель воздуха;
- 3 – нагреватель воздуха;
- 4 – вентилятор;
- 5 – обводной воздуховод ;
- 6 – воздуховод подвода свежего воздуха ;
- 7 – воздуховод отработанного воздуха ;
- 8 – воздуховод рециркуляционного воздуха.



**Рисунок 3 – Изменение температур воздуха на входе и выходе из слоя и температуры зерна в слое высотой 200 мм**



**Рисунок 4 – Изменение температур воздуха на входе и выходе из слоя и температуры зерна в слое высотой 275 мм**

Получены кривые изменения температур воздуха на входе и выходе из слоя и температуры зерна в слое высотой 100 мм, 200 мм и 275 мм (рисунки 2-7).

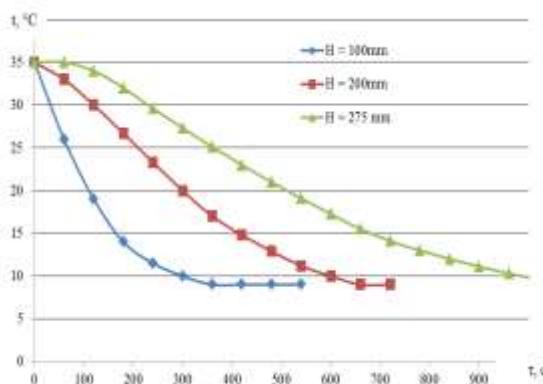


Рисунок 5 – Изменение температуры зерна в зависимости от наполнения (загрузки) во времени

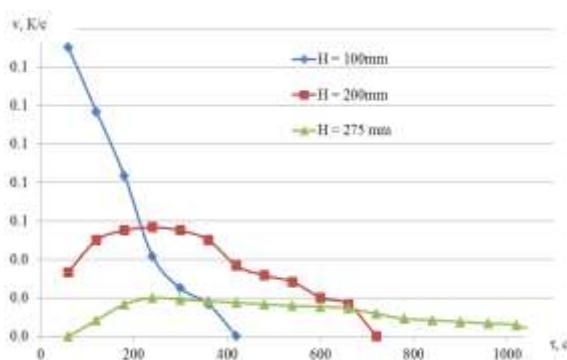


Рисунок 6 – График изменения скорости охлаждения зерна во времени

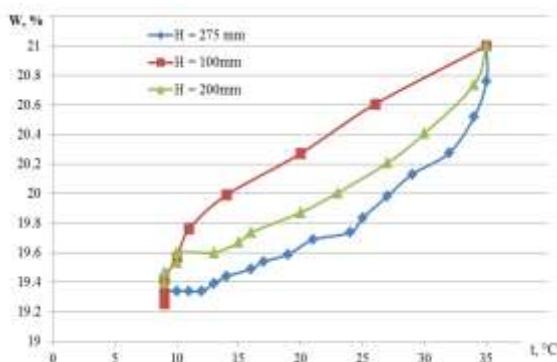


Рисунок 7 – График изменения влагосодержания зерна в зависимости от температуры

### ІІІ. МЕТОДИКА ОБОВ'ЄЩЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАННИХ

Аналіз уравнений описуючих процесс теплообміна між фільтруючимся газом і поверхністю частиц може бути описан в виде следую-щих критериальних уравнений [2]:

$$Nu = a \cdot Re_3^b \cdot Pr^{0.33}$$

где  $a, b$  – емпірическі коєфіцієнти, определя-ємые экспериментально;

$Re_3 = \frac{4\Phi Re}{6(1-\varepsilon)}$ ;  $Re_3 = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu}$ ,  $v$  – истинная ско-рост газа, м/с;

$\Phi = \frac{\pi d_u^2}{4S}$  – коєфіцієнт сферичності частиц

объемом  $V = \frac{\pi d_u^3}{6}$  и міделевым сечением  $S$ .

Для расчета теплоотдачи зернистого материала применяется уравнение (Балайка Б., 1962)

$$Nu = 2 \left( 1 + 0.276 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \right)$$

В приведенных выше уравнениях не учитыва-ется влияние высоты слоя зерна на условия теп-лообмена при движении воздуха. Поэтому, целью работы было изучения влияние высоты слоя на процесс охлаждения зерна.

Критериальное уравнение предлагается дополнить симплексом  $d/h$ , который учитывает высоту загрузки ( $h$ ) и диаметр слоя ( $d$ ).

Общий вид уравнения описывающего процесс охлаждения зерна шаровидной формы, к которому относится и исследуемое зерно рапса, можно представить в виде:

$$Nu = 2 + a \cdot Re_3^{0.5} \cdot Pr^{0.33} \left( \frac{d}{h} \right)^b \quad (1)$$

где  $Nu$  – критерий Нуссельта,  $Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}$ ;  $Pr$  – критерий Прандтля,  $Pr = \frac{\mu \cdot c}{\lambda}$ .

$\alpha$  – коєфіцієнт теплоотдачі от движущегося воздуха к зерну,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $\lambda$  -коєфіцієнт теп-ло-проводності воздуха,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $\mu$  - коєфіцієнт динаміческої вязкості,  $\text{Па} \cdot \text{С}$ ;  $c$  – теплоємкості воздуха,  $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}$ ;  $d$  – диаметр трубы, м.

$a, b$  – емпірическі коєфіцієнти, которые необходимо определить экспериментально.

Для определения неизвестных коєфіцієнтов в уравнении (1) необходимо разработать соотв-тствующую методику.

Исходные данные для расчета приведены в таблице 1.

Коєфіцієнт теплоотдачі  $\alpha$  определяється из уравнения:

$$Q_{oxl} = \alpha \cdot F \cdot (t_H - t_K);$$

где  $F$  – площасть поверхности зерна,  $\text{м}^2$ ;

$$F = \frac{1}{m_{1000}} \cdot S_1 \cdot M;$$

$S_1$  - площасть однієї зерновки,  $\text{м}^2$ ;

$M$  - маса зерна;

$$S_1 = \pi \cdot d v^2;$$

$dv$  - средний диаметр семян рапса, м.

Количество теплоты необходимое для охла-ждения зерна определяется из уравнения:

$$Q_{oxl} = M \cdot c_3 \cdot (t_H - t_K)$$

где  $c_3$  – теплоемкость зерна рапса, Дж/кг·К;  $t_H$  – начальная температура зерна, °C;  $t_K$  – конечная температура зерна, °C;

Общее количество теплоты состоит из теплоты на охлаждение зерна ( $Q_{oxi}$ ) и потерь в окружающую среду, которые принимаются на уровне 5 % от  $Q_{oxi}$ :

$$Q_{общ} = (1 + 0.05)Q_{oxi}$$

Эффективный коэффициент теплообмена

$$\alpha_3 = \frac{Q_{общ}}{F \cdot (t_H - t_K)}.$$

Расчетные значения параметров, входящих в уравнение (1) приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета

Показатель	Единицы измерения	Значение
Внутренний диаметр установки	м	0,104
Высота слоя зерна	м	0,1; 0,2; 0,375
Масса слоя зерна, $M$	кг	0,601; 1,206; 1,650
Начальная температура зерна, $t_H$	°C	35
Конечная температура зерна, $t_K$	°C	9
Диаметр семян рапса, $d_v$	мм	1,5...2,5
Теплоемкость рапса, $c_3$	Дж/(кг·К)	2200
Коэффициент теплопроводности рапса	Вт/(м·К)	0,35
Насыпная плотность слоя	кг/м <sup>3</sup>	708
Плотность твердой фазы	кг/м <sup>3</sup>	1150
Масса 1000 шт зерна рапса, $m_{1000}$	гр	5
Скорость движения воздуха, $v$	м/с	0,8
Свойства воздуха		
Плотность	кг/м <sup>3</sup>	1,293
Теплоемкость	Дж/кг·К	1006
Коэффициент теплопроводности	Вт/(м·К)	0,024
Коэффициент динамической вязкости	Па·с	1,742 · 10 <sup>-5</sup>
Температура воздуха	°C	3,8
Температура воздуха по мокрому термометру	°C	1,1
Относительная влажность воздуха	%	82
Влагосодержание	гр/кг	4,1
Энталпия воздуха на входе	Дж/к	14,1

Таблица 2 – Значения параметров входящих в уравнение (1)

Параметр	Высота слоя, м		
	0,1	0,2	0,275
Эффективный коэффициент теплообмена	2,188	1,277	0,851
Критерий Нуссельта, Nu	9,328	5,441	3,627
Критерий Рейнольдса, Re	1671	1671	1671
Критерий Прандтля, Pr	0,718	0,718	0,718
Симплекс, d/l	1,04	0,52	0,38

Для определения неизвестных коэффициентов  $a$  и  $b$  преобразуем уравнение (1) к следующему виду:

$$\frac{Nu - 2}{Re_3^{0.5} \cdot Pr^{0.33}} = a \cdot \left(\frac{d}{h}\right)^b$$

Выполняем построение в логарифмических координатах зависимости комплекса входящего в левую часть уравнения от симплекса  $d/h$  (рис. 8).

Значения неизвестных коэффициентов будут равны:  $a=0,2$ ;  $b=1,423$ .

Полученное уравнение для определения коэффициента теплоотдачи рапса будет иметь следующий вид:

$$Nu = 2 + 0,2 \cdot Re_3^{0.5} \cdot Pr^{0.33} \cdot \left(\frac{d}{h}\right)^{1,423}, \quad (2)$$

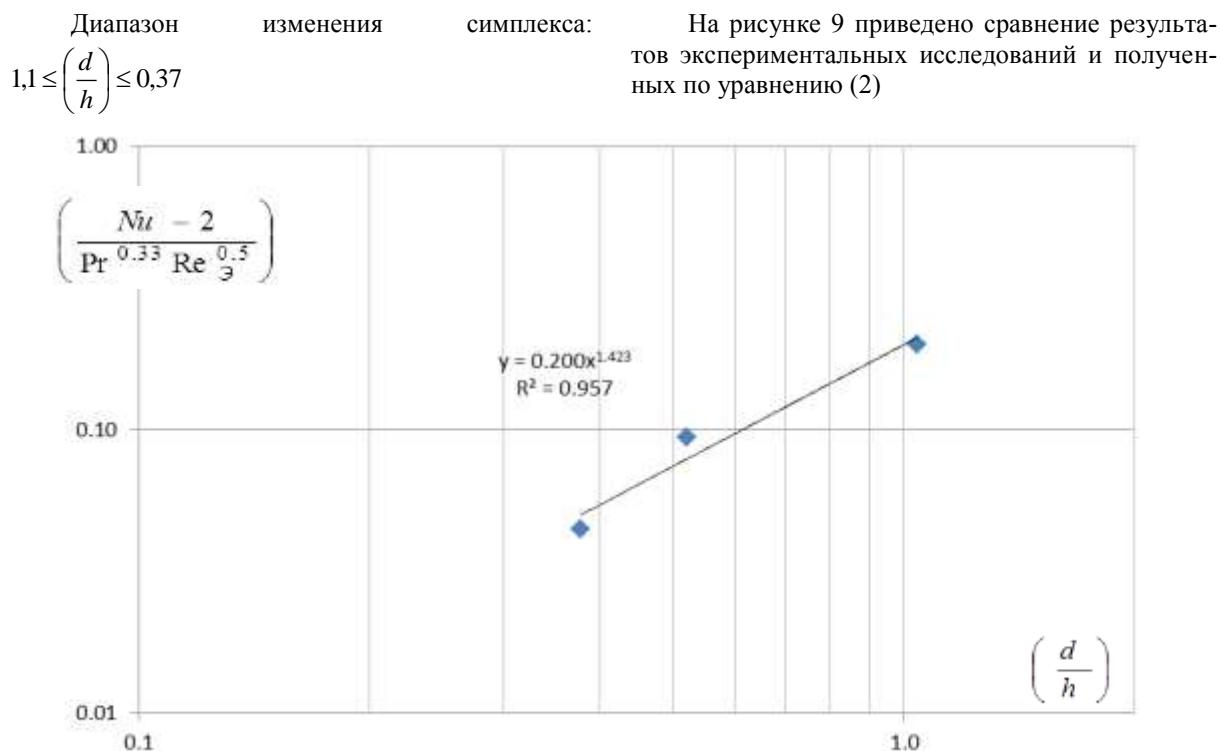
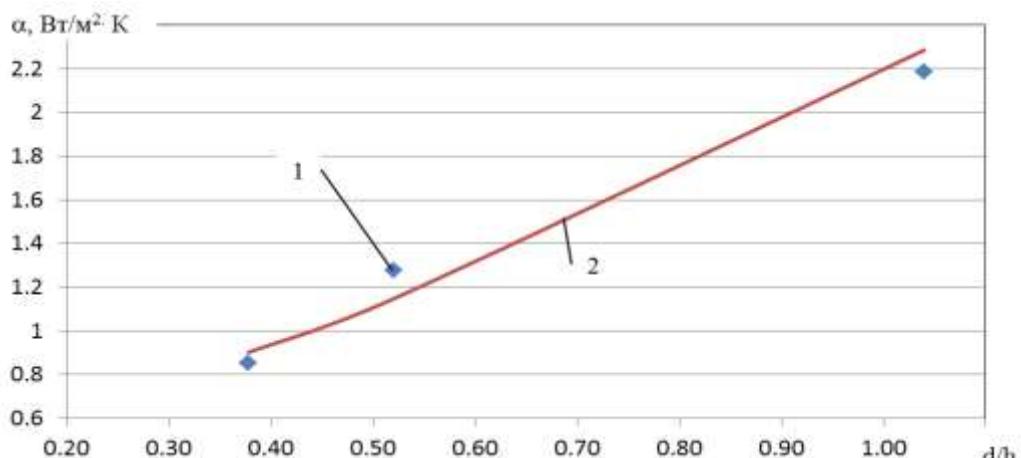


Рисунок 8 – Определение значений эмпирических коэффициентов в уравнении (1)

Рисунок 9 – График изменения коэффициента теплообмена от воздуха к слою зерна  
1 – эксперимент, 2 – расчет.

#### IV. ВЫВОДЫ

Выполнены экспериментальные исследования процессов теплообмена в плотном продуваемом слое мелкосеменного зерна. Получено обобщающее уравнение для коэффициентов теплообмена на примере рапса. Относительная погрешность определения коэффициента теплоотдачи составляет 10 %. Обобщенные результаты могут быть использованы для проектирования систем первичной холодильной обработки мелкосеменного зерна.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Титлов А.С. Анализ перспектив применения искусственного холода для хранения зерна в стра-

нах СНГ / А.С.Титлов, С.Н.Кудашев, С.Н. Петушенко // Инновационные пищевые технологии в области хранения и переработки сельскохозяйственного сырья : материалы международ. науч.-практ. конф. (23-24 июня 2011 г.) / Рос. акад. с.х. наук, Гос. науч. учреждение Краснодар. НИИ хранения и переработки с.-х. продукции. – Краснодар: Издательский Дом – Юг, 2011. – С. 49-53.

2. Горбис З.Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков / З.Р.Горбис. – 2-е изд., перераб. и доп . – М.: Энергия, 1970 . – 424 с.