

УДК 664.72.004:504

С. Н. Петушенко

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

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ 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 ПЕРВИЧНІЙ 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 обработке 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 °С.

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 влагосодержаний потока воздуха, как агента низкотемпературной сушки.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

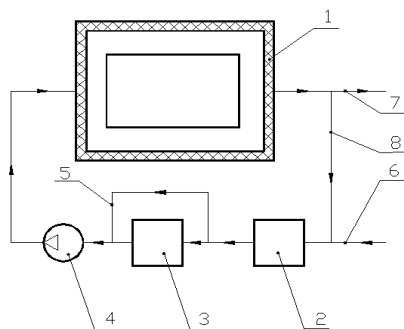
Среди всех типов зерновых продуктов особый интерес для низкотемпературной сушки представляют сорта мелкого зерна (рапс, лен, просо, горчица, амарант и др.). Они из-за незначительного характерного линейного размера наиболее подвержены повреждению при сушке нагревом.

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.

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 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 микроанометр 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.

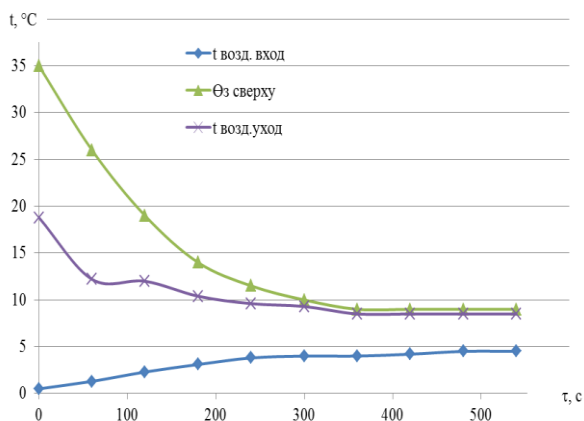


Рисунок 2 – Изменение температур воздуха на входе и выходе из слоя и температуры зерна в слое высотой 100 мм

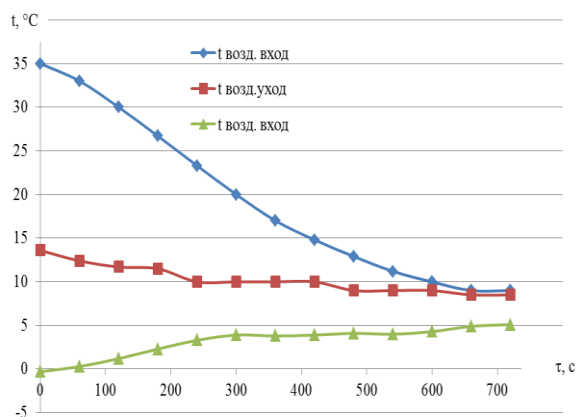


Рисунок 3 – Изменение температур воздуха на входе и выходе из слоя и температуры зерна в слое высотой 200 мм

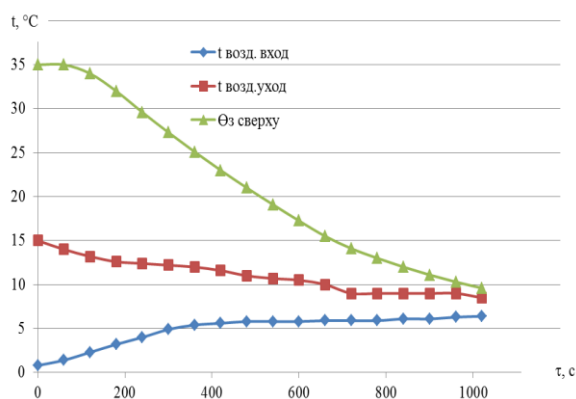


Рисунок 4 – Изменение температур воздуха на входе и выходе из слоя и температуры зерна в слое высотой 275 мм

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).

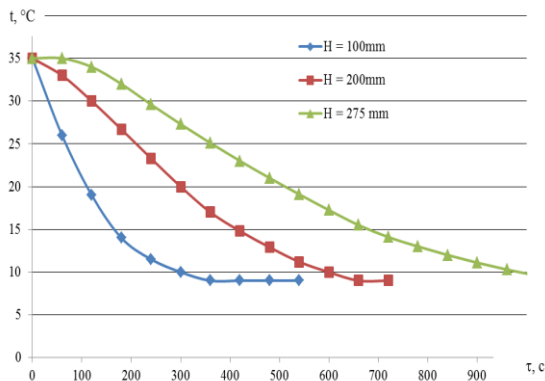


Рисунок 5 – Изменение температуры зерна в зависимости от наполнения (загрузки) во времени

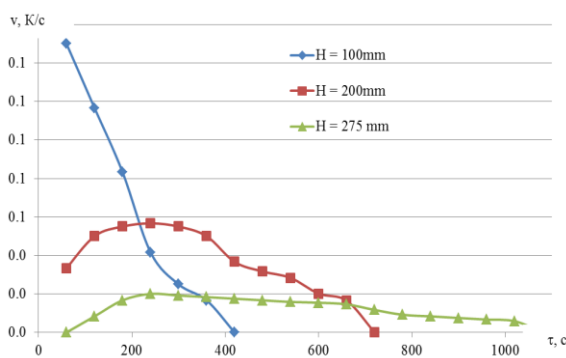


Рисунок 6 – График изменения скорости охлаждения зерна во времени

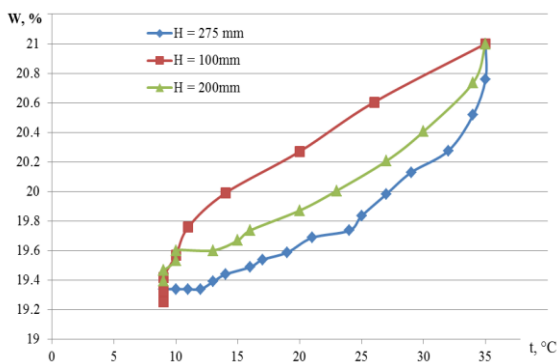


Рисунок 7 – График изменения влагосодержания зерна в зависимости от температуры

III. МЕТОДИКА ОБОБЩЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Анализ уравнений описывающих процесс теплообмена между фильтрующимся газом и поверхностью частиц может быть описан в виде следующих критериальных уравнений [2]:

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

где a, b – эмпирические коэффициенты, определяемые экспериментально;

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

$$\Phi = \frac{\pi d_y^2}{4S}$$

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

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

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

В приведенных выше уравнениях не учитывается влияние высоты слоя зерна на условия теплообмена при движении воздуха. Поэтому, целью работы было изучения влияния высоты слоя на процесс охлаждения зерна.

Критериальное уравнение предлагается дополнить симплексом $\frac{d}{h}$, 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:

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

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

критерий Прандтля, $Pr = \frac{\mu \cdot c}{\lambda}$.

α – коэффициент теплоотдачи от движущегося воздуха к зерну, Вт/(м²·К); λ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К); μ – коэффициент динамической вязкости, Па·С; c – теплоемкость воздуха, Дж/кг·К; d – диаметр трубы, м.

a, b – эмпирические коэффициенты, которые необходимо определить экспериментально.

Для определения неизвестных коэффициентов в уравнении (1) необходимо разработать соответствующую методику.

Исходные данные для расчета приведены в таблице 1.

Коэффициент теплоотдачи α определяется из уравнения:

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

где F – площадь поверхности зерна, м²;

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

S_1 – площадь одной зерновки, м²;

M – масса зерна;

$$S_1 = \pi \cdot dv^2;$$

dv – средний диаметр семян рапса, м.

Количество теплоты необходимое для охлаждения зерна определяется из уравнения:

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

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

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

$$Q_{общ} = (1 + 0.05)Q_{охл}$$

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	°С	35
Конечная температура зерна, t_K	°С	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 ³	708
Плотность твердой фазы	кг/м ³	1150
Масса 1000 шт зерна рапса, m_{1000}	гр	5
Скорость движения воздуха, v	м/с	0,8
Свойства воздуха		
Плотность	кг/м ³	1,293
Теплоемкость	Дж/кг·К	1006
Коэффициент теплопроводности	Вт/(м·К)	0,024
Коэффициент динамической вязкости	Па·С	$1,742 \cdot 10^{-5}$
Температура воздуха	°С	3,8
Температура воздуха по мокрому термометру	°С	1,1
Относительная влажность воздуха	%	82
Влажосодержание	гр/кг	4,1
Энтальпия 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 уравнения для определения коэффициента теплоотдачи рапса будет иметь следующий вид:

$$Nu = 2 + 0.2 \cdot Re_3^{0.5} \cdot Pr^{0.33} \cdot \left(\frac{d}{h}\right)^{1.423}, \quad (2)$$

Диапазон изменения симплекса: На рисунке 9 приведено сравнение результатов экспериментальных исследований и полученных по уравнению (2)

$$1,1 \leq \left(\frac{d}{h} \right) \leq 0,37$$

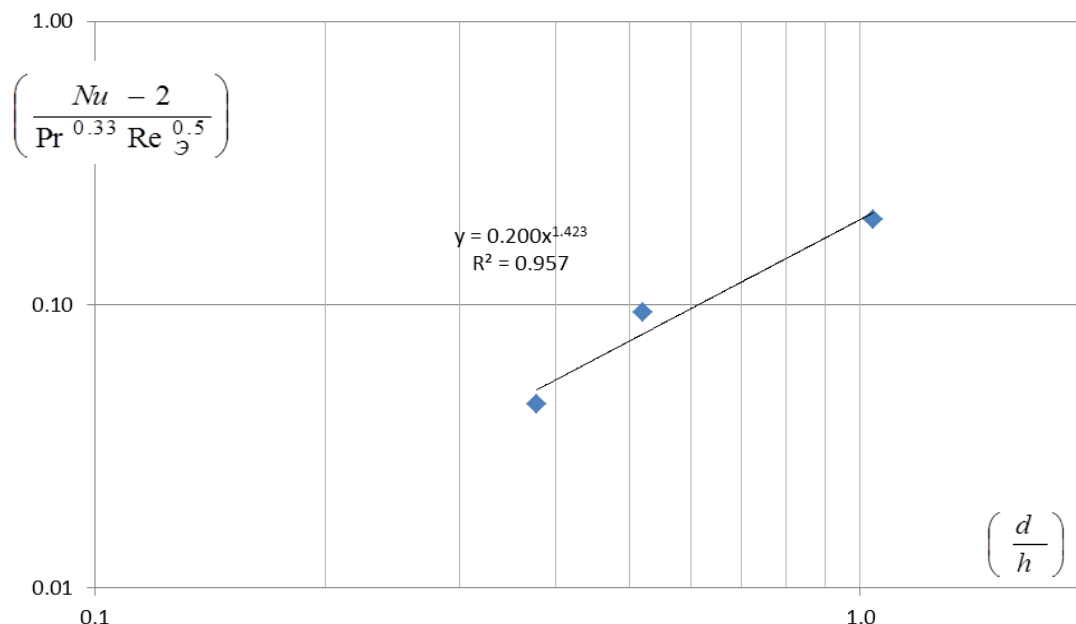


Рисунок 8 – Определение значений эмпирических коэффициентов в уравнении (1)

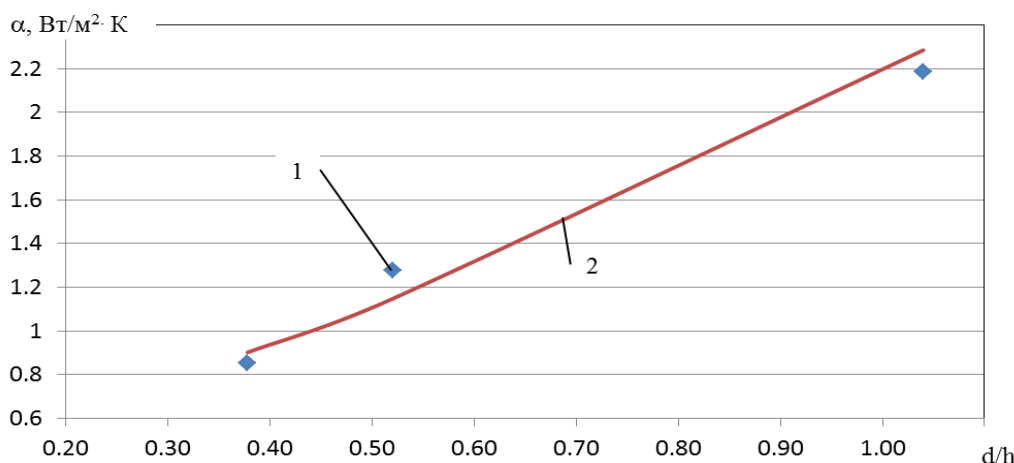


Рисунок 9 – График изменения коэффициента теплообмена от воздуха к слою зерна
1 – эксперимент, 2 – расчет.

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 международного 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.

Получена в редакции 17.05.2013, принята к печати 04.06.2013