

# ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗЕРНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ

*Денис Демьяненко*

*Таврический государственный агротехнологический университет  
Пр. Б. Хмельницкого, 18, Мелитополь, 72310, Украина E-mail: q3uriel@ya.ru*

*Denis Demyanenko*

*Tavria State Agrotechnological University  
B.Khmelnytsky Avenue, 18, Melitopol, 72310, Ukraine. E-mail: q3uriel@ya.ru*

**Аннотация.** В данной статье рассмотрен характер влияния влаготепловой обработки (процесс микронизации) на физико-механические свойства зерновых кормов, таких как соя, ячмень и рожь. Экспериментально установлена средняя площадь поверхности единичной частички для каждого вида зернового материала. Получены зависимости изменения массы, коэффициента внешнего трения и влажности от температуры и времени обработки. Рассчитано соотношение площади тепловой обработки и влаги в зерне, что подтверждают полученные в ходе лабораторных исследований зависимости, а именно то, что наиболее интенсивное испарение влаги проходит в том виде зерна, где соотношение площади тепловой обработки и влаги в зерне наибольшее. Для обоснования оптимальных параметров процесса влажно-тепловой обработки зерновых кормов путем математического моделирования однослойной дозированной подачи зернового материала по плоскости обработки используется метод дискретного элемента, для чего, в свою очередь, были получены зависимости не только для навесок зерна, но и для отдельных частичек каждого из исследуемых материалов. Также были определены значения угла естественного откоса для исследуемых типов зерна и коэффициент внутреннего трения. Предоставлено теоретическое обоснование для результатов, полученных в ходе исследований. В завершении статьи сделаны выводы по научной работе. Также определены дальнейшие пути проведения научных исследований, в частности, полученные путем лабораторных исследований зависимости физико-механических свойств зерновых материалов от температуры и времени обработки позволяют провести расчеты математической модели однослойного перемещения зернового материала по наклонной круговой вибрационной поверхности.

**Ключевые слова:** физико-механические свойства, коэффициент трения, влажность, зерновые корма, тепловая обработка, инфракрасное излучение, микронизация.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Перспективным способом подготовки зерновых кормов к скармливанию является влаготепловая обработка, где микронизация занимает особое место.

В процессе тепловой обработки зерна изменяются физико-механические свойства материала, что суще-

ственно влияет на параметры его взаимодействия с рабочим органом и, в целом, – на равномерное однослойное распределение перемещаемого с перекачиванием зерна на плоскости обработки, что является важным фактором качества теплового процесса. Изменения физико-механических свойств зерновых материалов в процессе тепловой обработки требуют соответствующих изменений параметров рабочих органов механизма его однослойной дозированной подачи [1–4].

Для определения закономерностей изменений параметров оборудования (частота и амплитуда вибрации, а также динамический угол наклона рабочей поверхности), необходимо установить зависимости физико-механических свойств зерновых материалов (масса, коэффициент внутреннего и внешнего трения, влажность, угол естественного откоса) от температуры и времени обработки. Без этих данных невозможно построить математическую модель процесса качественной подачи зерна и оптимальных параметров тепловой обработки [5, 6].

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ предыдущих исследований показывает, что существуют литературные источники, где приведены исследования физико-механических свойств зерна, но результатов исследований, которые показали бы зависимости одновременного изменения массы, коэффициентов трения и влажности от температуры и времени обработки, нами не обнаружено [7, 8].

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является выявление зависимостей коэффициентов трения, массы, влажности от температуры и времени обработки зернового материала. Это позволит в дальнейшем обосновать оптимальные параметры процесса влаготепловой обработки зерновых кормов путем математического моделирования однослойного перемещения зернового материала по поверхности обработки горизонтальными колебаниями.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Метод исследований предусматривает создание условий близких к условиям процесса обработки зер-

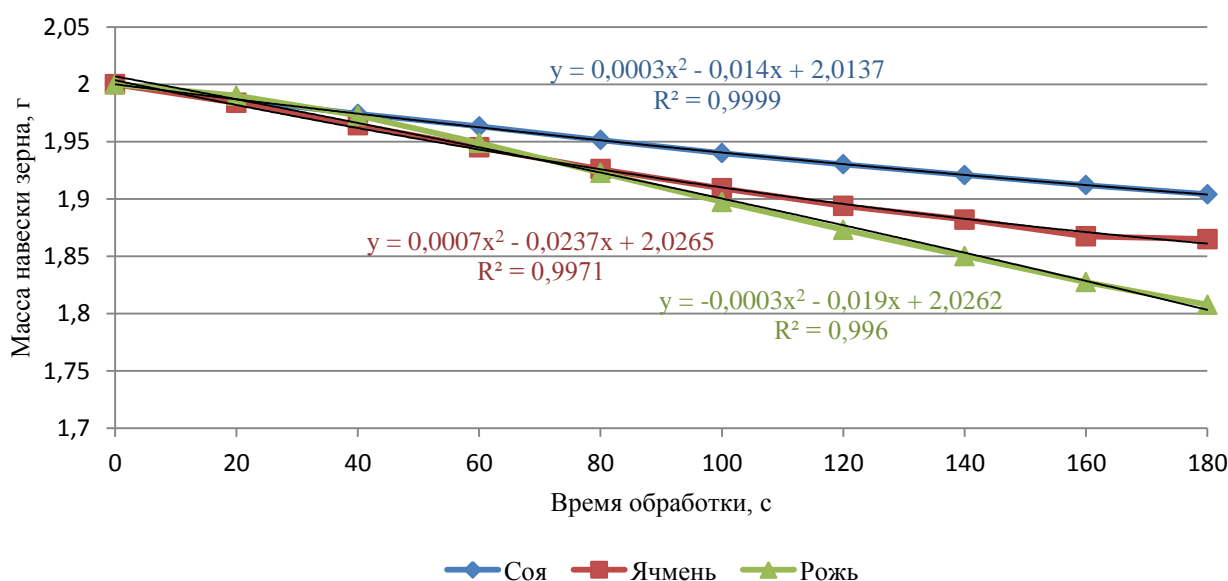
на инфракрасным излучением. Методика определения зависимостей массы и влажности зерна (соя, ячмень и рожь) от температуры и времени обработки включала согласно [9] следующие этапы: увлажнение всех навесок зерна до 20% и ее контроль с помощью влагомера ВСП-100, отбор проб массой 2г. с каждой навески для проведения опытов в пятикратном повторности.

Нагрев проб зерна проводилась на протяжении 180 секунд в анализаторе влажности «AXIS» при температуре 130°C с динамическим взвешиванием и контролем влажности. Зависимости коэффициента трения от температуры и времени нагрева были получены на лабораторной установке ТМ21-А, где зерно и поверхность трения нагревались до заданной температуры в 130°C и пошагово определялись коэффици-

енты трения на каждом этапе изменения температуры, согласно указаниям [10].

Для определения коэффициентов внутреннего трения необходимо знать углы естественного откоса для каждого материала. Последние были выявлены на лабораторной установке типа УВТ-3М в соответствии с указаниями [11].

Полученные зависимости показывают характер изменения массы и влажности навесок различных зерновых культур в зависимости от времени обработки. Масса частиц снижается с разной интенсивностью (рис. 1). Так масса навески зерна сои в среднем количестве 11 зерен меняется при обработке при температуре 130°C согласно нелинейной зависимости  $M_{nc} = 0,0003x^2 - 0,014x + 2,0137$ . Масса навесок ячменя (52 зерна) и ржи (63 зерна), соответственно:  $M_{ня} = 0,0007x^2 - 0,0237x + 2,0265$  и  $M_{рп} = 0,0003x^2 - 0,019x + 2,0262$ .



**Рис. 1.** Зависимость массы навески зерна от времени тепловой обработки  
**Fig. 1.** Dependence of grain sample mass on the time of heat treatment

Масса навесок снижается в разной степени из-за того, что влияние температуры в 130°C на частички разного размера и плотности проявляется неодинаково. Необходимо экспериментально определить площадь поверхности зернин каждого вида материала. Для этого использовалась методика определения эквивалентного диаметра зерна. Определялся эквивалентный диаметр зерна следующим образом: из партии зерна отбиралась навеска массой 0,5 кг, руководствуясь методикой [12]. Из пробы выделялись две навески зерна по 5 г и от каждой из них отобраны по 100 зерен. Взвешивались отобранные 100 зерен, и определялась средняя масса одного зерна. В наполненный керосином мерный цилиндр помещались 100 отобранных зерен и по разнице отметок уровня керосина до и после погружения зерен находился средний объем зерна  $V_3, \text{см}^3$ .

Определение среднего объема одного зерна  $V_3$  повторялось еще раз на другой партии из 100 зерен и для дальнейших расчетов принималось среднее значение из двух определений.

По полученному значению объема зерна был найден эквивалентный диаметр для каждого вида зерна  $D_3$  по формуле:

$$D_3 = 1,24\sqrt[3]{V_3}, \quad (1)$$

где:  $V_3$  – средний объем навески зерна.

По полученному значению  $D_3$  определяют удельную площадь поверхности  $S_n, \text{см}^2/\text{г}$  исходного зернового материала по формуле:

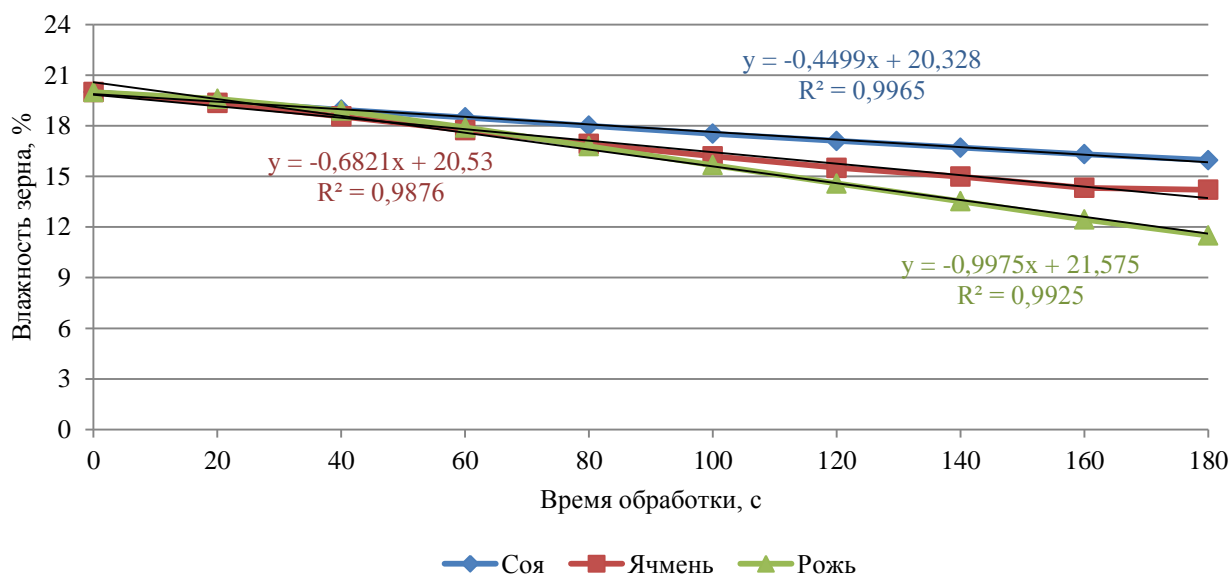
$$S_n = \frac{6}{\rho \cdot D_3}, \quad (2)$$

где:  $\rho$  – плотность зернового материала,  $\text{г}/\text{см}^3$  (для сои –  $0,75\text{г}/\text{см}^3$ ; для ячменя –  $0,61 \text{г}/\text{см}^3$ ; для ржи –  $0,67\text{г}/\text{см}^3$ ).

Поскольку средняя масса одной зернины каждого вида материала известна, можно определить площадь поверхности единичной частички зерна, которая в среднем составляет  $47,9\text{мм}^2, 19\text{мм}^2$  и  $16,8 \text{мм}^2$  для сои, ячменя и ржи соответственно. Допустим, что воздействие тепла осуществляется на половине этих площадей. Зная среднее количество зерен в каждой навеске,

которая составляет 11 для сои, 52 для ячменя и 63 для ржи, можем получить соотношение площади тепловой обработки и влаги в зерне, составляющих, соответственно, 1,32 мм<sup>2</sup>/мг для сои, 2,47 мм<sup>2</sup>/мг для ячменя и 2,65 мм<sup>2</sup>/мг для ржи.

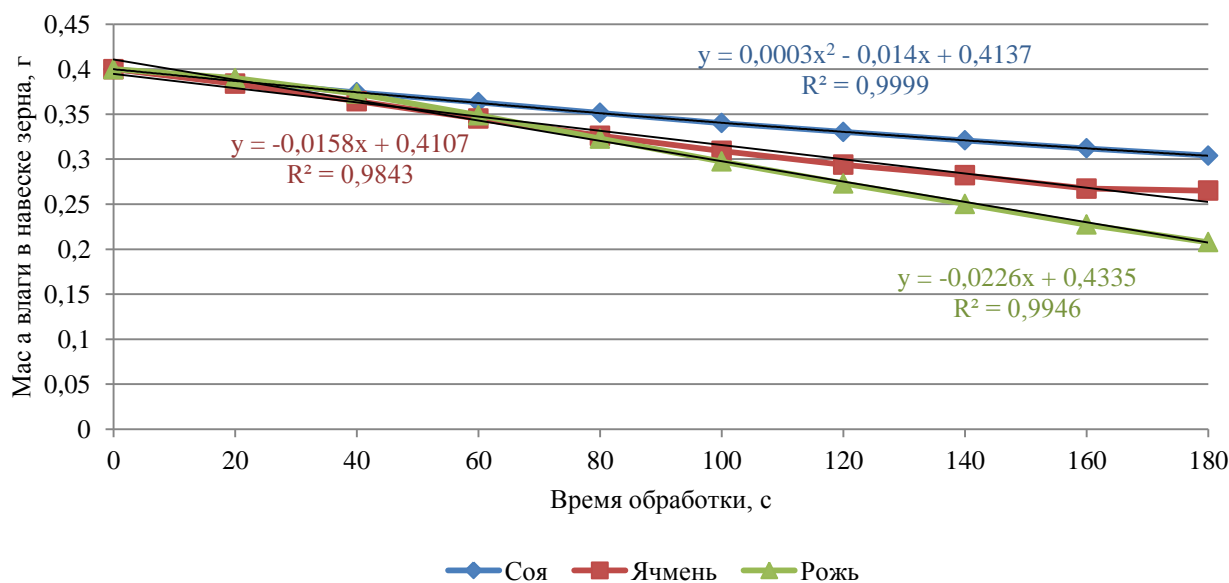
Рассчитанные соотношения подтверждают полученные в ходе лабораторных исследований зависимости, а именно то, что наиболее интенсивное испарение влаги проходит в том виде зерна, где соотношение площади тепловой обработки и влаги в зерне наибольшее.



**Рис. 2.** Зависимость влажности зерна от времени тепловой обработки  
**Fig. 2.** Dependence of grain moisture on the time of heat treatment

Зависимости влажности для разных видов зернового материала от времени тепловой обработки описываются следующими уравнениями: для сои  $y = -0,4499x + 20,328$ ; для ячменя  $y = -0,6821x + 20,53$ ;

для ржи  $y = -0,9975x + 21,575$ . Полученные значения позволили рассчитать массу остаточной влаги в зернине. (рис 3).



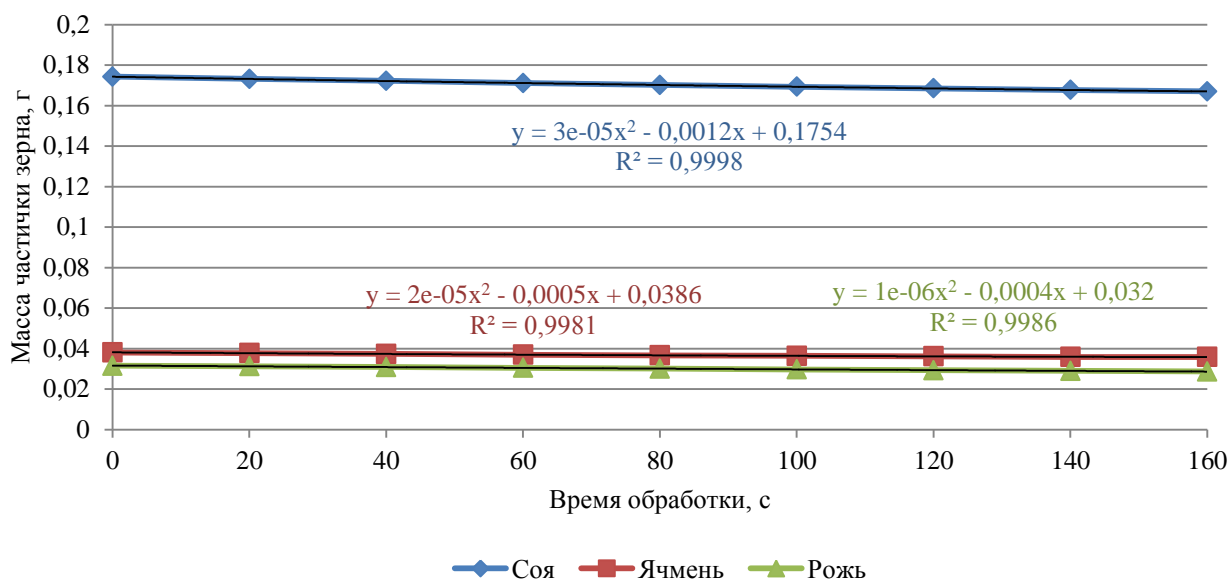
**Рис. 3.** Зависимость массы остаточной влаги в навеске зерна от времени обработки  
**Fig. 3.** Dependence of the mass of the residual moisture in the grain sample on processing time

Зависимости изменения массы остаточной влаги в зерне от времени обработки для разных видов зернового материала выглядят следующим образом: для сои  $y = 0,0003x^2 - 0,014x + 0,4137$ ; для ячменя  $y = -0,0158x + 0,4107$ ; для ржи  $y = -0,0226x + 0,4335$ . При обосновании оптимальных параметров процесса

влажно-тепловой обработки зерновых кормов путем математического моделирования однослойной дозированной подачи зернового материала по плоскости обработки используется метод дискретного элемента [13]. Для этого необходимо получить зависимости не только для навесок зерна, но и для отдельных части-

чек каждого из исследуемых материалов. Поскольку количество частиц в каждой навеске известна, получаем зависимости массы и влажности от времени об-

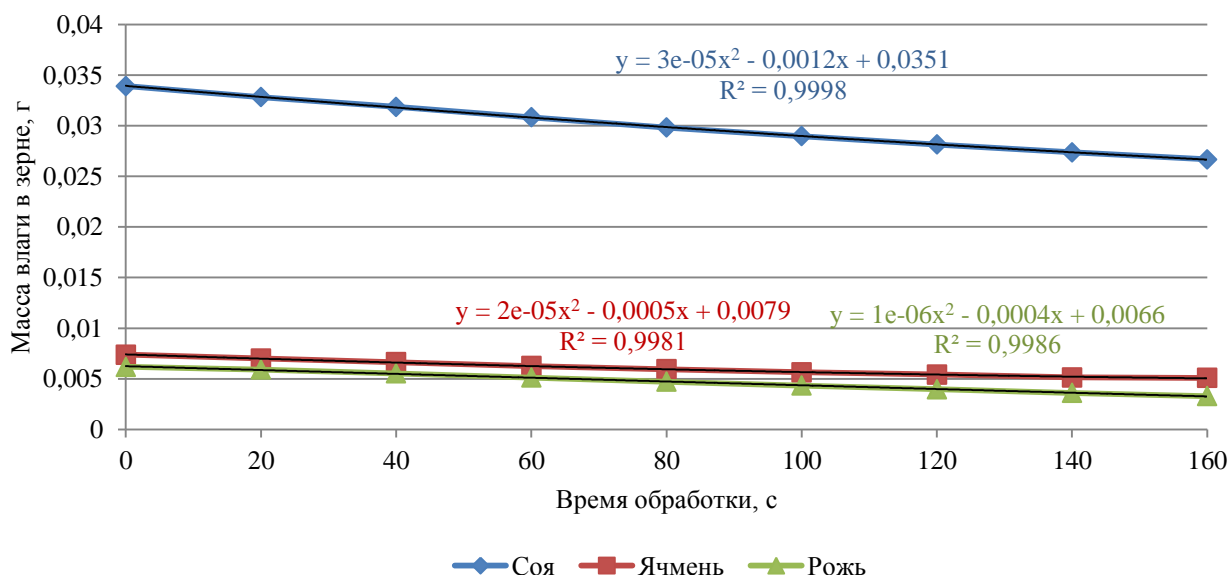
работки для одной частички каждого вида зерна (рис. 4), а также зависимость массы влаги в единичной частичке зерна от времени обработки (рис. 5).



**Рис. 4.** Зависимость массы единичной частицы от времени обработки  
**Fig. 4.** Dependence of single grain particle mass on processing time

Зависимости изменения массы единичной частицы для разных видов зернового материала выглядят следующим образом: для сои  $y = 3e-05x^2 - 0,0012x + 0,1754$ ; для ячменя  $y = 2e-05x^2 - 0,0005x + 0,0386$ ; для ржи  $y = 1e-06x^2 - 0,0004x + 0,032$ .

Различная интенсивность изменения влаги объясняется тем, что исследуемые виды материала имеют различное соотношение площади тепловой обработки и влаги в зерне, которые составляют 1,32 мм<sup>2</sup>/мг для сои, 2,47 мм<sup>2</sup>/мг для ячменя и 2,65 мм<sup>2</sup>/мг для ржи соответственно.

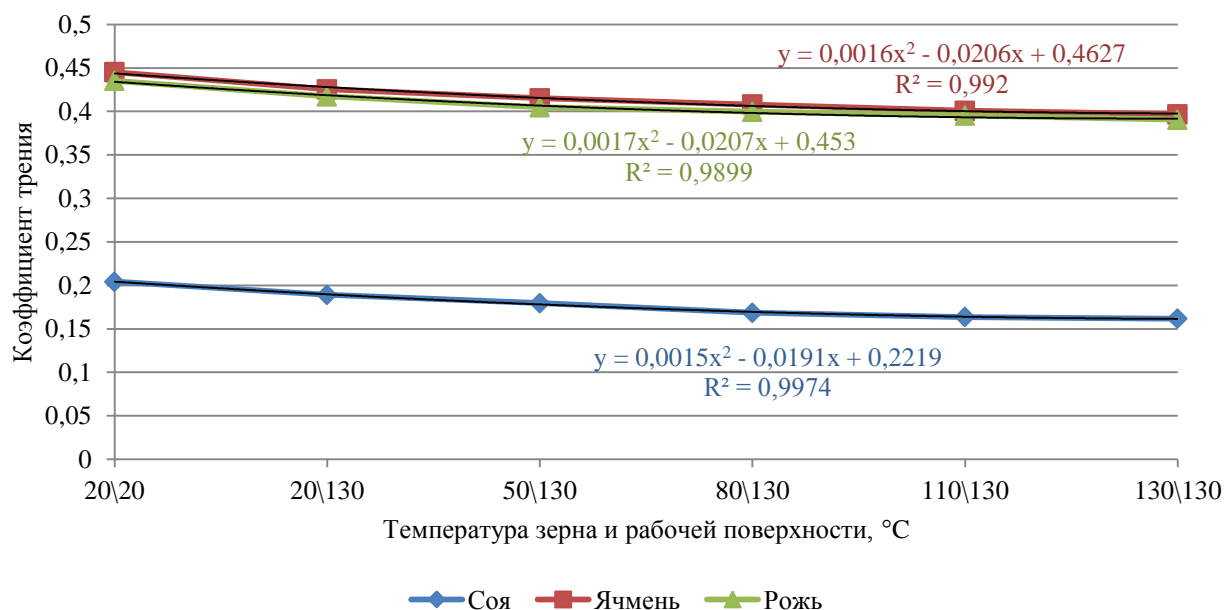


**Рис. 5.** Зависимость массы влаги в единичной частичке зерна от времени обработки  
**Fig. 5.** Dependence of the mass of residual moisture in a grain particle on processing time

Масса влаги в единичной частичке зерна и температура зерна и рабочей поверхности для разных видов зернового материала находятся в нелинейной зависимости и описываются уравнениями: для сои  $y = 3e-05x^2 - 0,0012x + 0,0351$ ; для ячменя  $y = 2e-05x^2 - 0,0005x + 0,0079$ ; для ржи  $y = 1e-06x^2 - 0,0004x + 0,0066$ . Нелинейность изменения влаги можно пояс-

нить тем, что с уменьшением количества влаги в зерне, интенсивность ее испарения также уменьшается.

Также были получены зависимости коэффициента внешнего трения от температуры и времени обработки для различных степеней нагрева. Результаты измерений изображены графически на рисунке 6.

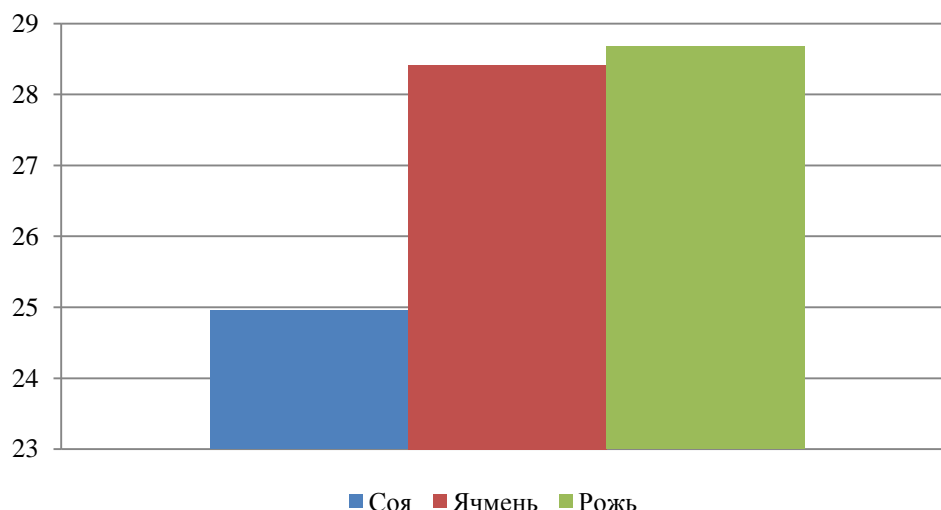


**Рис 6.** Зависимость коэффициента трения зерна по металлу от температуры  
**Fig. 6.** Dependence of metal-grain friction coefficient on temperature

Коэффициент трения зерна по металлу для разных видов зернового материала зависит от температуры взаимодействующих объектов, и описываются нелинейными уравнениями: для сои  $y = 0,0015x^2 - 0,0191x + 0,2219$ ; для ячменя  $y = 0,0016x^2 - 0,0206x + 0,4627$ ; для ржи  $y = 0,0017x^2 - 0,0207x + 0,453$ .

Такой характер изменения коэффициентов трения объясняется тем, что при нагревании уменьшаются силы молекулярного взаимодействия веществ, что влечет за собой изменение коэффициента трения [14].

Значения угла естественного откоса для исследуемых материалов составляют: для сои – 24,96; для ячменя – 28,42; для ржи – 28,68. Определение угла естественного откоса (рис. 7) позволило рассчитать коэффициенты внутреннего трения для каждого вида зернового материала, которые составляют: для сои – 0,414; для ячменя – 0,479; для ржи – 0,484 соответственно.



**Рис. 7.** Угол естественного откоса  
**Fig. 7.** The angle of repose

## ВЫВОДЫ

1. Рассмотрен характер влияния тепловой обработки на физико-механические свойства зерновых кормов, таких как соя, ячмень и рожь.
2. Экспериментально установлена средняя площадь поверхности единичной частички для каждого

вида материала. Рассчитано соотношение площади тепловой обработки и влаги в зерне.

3. Получены зависимости изменения массы, коэффициента внешнего трения и влажности от температуры и времени обработки, как для навесок, так и для единичных частичек зерновых материалов. Также были определены значения угла естественного откоса

для исследуемых типов зерна, что позволило рассчитать коэффициент внутреннего трения.

4. Полученные путем лабораторных исследований зависимости физико-механических свойств зерновых кормов от температуры и времени обработки позволяют провести расчеты математической модели однослойного перемещения зернового материала по наклонной круговой вибрационной поверхности и построить опытный образец установки для проверки адекватности этой модели.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Шацкий В. В. 1998.** Моделирование механизированных процессов приготовления кормов: монография. ИМЖ УААН. Запорожье, Х-ПРЕСС, 140.

2. **Брагинец Н.В. 1989.** Микронизация зерна для кормовых целей. Механизация и электрификация сельского хозяйства. №1. 29-31.

3. **Худоногов А.М. 1988.** Технология обработки дикорастущего и сельскохозяйственного сырья высококонцентрированным инфракрасным нагревом. Диссертация доктора технических наук. Иркутск. 392.

4. **Калниньш И.Я., Панков Я.А. 1983.** Обработка фуражного зерна инфракрасным облучением. Кормопроизводство. №10. 16-18.

5. **Лукьяненко В. 2013.** Математическая модель движения взаимодействующих семян по наклонной вибрирующей поверхности и численные методы решения систем кинематических уравнений. Motrol. Том 15. 135-142.

6. **Мишуров Н.П. 1990.** Обоснование оптимальных параметров и режимов работы установки для обработки зерна ИК-излучением: Автореферат диссертации кандидата технических наук: 05.20.01. 13.

7. **Щербаков В.Г. 1977.** Химия и биохимия масличных зерен. М.: Пищевая промышленность. 163.

8. **Максаков В.Я. 1983.** Влияние температуры и других действий на качество протеина кормов. Вестник сельскохозяйственной науки. № 11. 95-98.

9. **ГОСТ 1996.** Семена масличные. Метод определения влажности: ГОСТ 10856-96. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Минск. 6.

10. **ГОСТ 1973.** Зерно. Методы определения качества: ГОСТ 3040-55. М.: Изд. стандартов. 7.

11. **ГОСТ 2006.** Комбикорма, сырье. Методы определения объемной массы и угла естественного откоса: ГОСТ 28254-89. М.: Ст. информ. Москва. 4.

12. **Ревенко И.И., Брагинец М.В., Ребенко В.И., 2009.** Машины и оборудование для животноводства: Учебник. К.: Кондор. 46-57. (Украина).

13. **Арсентьев В.А. 2010.** Методы динамики частиц и дискретных элементов как инструмент исследования и оптимизации процессов переработки природных материалов. Обогащение руд. №1. 30-35.

14. **Николаев С.А. 2011.** Молекулярное взаимодействие. Журнал «Самиздат». 1-3.

15. **Химка С.М. 2012.** Обоснование параметров вибрационного дозатора сыпучих кормов: Авторефе-

рат диссертации кандидата технических наук: 05.05.11. М.: 23. (Украина).

16. **Карлин С. 1971.** Основы теории случайных процессов / Перевод с английского под редакцией. Коваленко И.Н. М. Мир. 61.

17. **Завалий А., Янович И. 2009.** Система инфракрасного изотермического нагрева поверхности. Motrol. Том 11В. 172-175.

18. **Завалий А. 2011.** Оптико-геометрические модели проектирования отражающих поверхностей устройств инфракрасной сушки. Motrol. Том 13. 150-158.

19. **Dale N.M., Araba M., Whittle E. 1987.** Protein solubility as an indicator of optimum processing of soyburn meal. Proceedings, Yeorgia nutrition conf, for the feed industry. Atlanta, LA. 11. 18-20.

20. **Калниньш И.Я. 1984.** Предварительная обработка кормового зерна. Мукомольно-элеваторная промышленность. №5. 30.

21. **Никитин Л.О., Бабич А.Я., Дрогобычский Т.М. 1997.** Управление прибором ИК излучения. Вестник аграрной науки. №4. 66-67. (Украина).

## CHANGES OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF GRAIN FEED DURING HEAT TREATMENT

**Summary.** Current article discusses the dependence of the heat treatment effect using infrared radiation (the process of micronization) on the physical and mechanical properties of grain feed, such as soybeans, barley and rye. The average surface area of single particles for each type of material was experimentally set. The dependences of the weight change, coefficient of friction and humidity on temperature and processing time are received. The ratio of the thermal processing area and the moisture in the grain was calculated. This ratio confirms obtained during laboratory tests dependences, namely, the fact that the most intense evaporation takes place in the forms of grains, wherein the ratio of the thermal processing area and the moisture in the grain is the largest. To justify the optimal parameters of wet-heat treatment process for feed grain by mathematical modeling of single-layer dosing delivery of grain material, the discrete element method is used. It requires obtaining dependences not only for batches of grain, but also for the individual particles of each of the test materials. The values of the repose angle for the studied types of grain, which allows calculating the coefficient of internal friction, are obtained. The theoretical basis for the results obtained in the course of research was highlighted. At the end of the article the conclusions of the scientific work are presented. The further ways of scientific research are defined. In particular, obtained by laboratory tests dependences of physical and mechanical properties of grain materials on temperature and processing time allow to calculate the mathematical model of a single layer moving of grain materials on the inclined circular vibrating surface.

**Key words:** physical and mechanical properties, friction, humidity, grain feed, thermal treatment, infrared radiation, micronization.