
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 519.87

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ПОСЛЕУБОРОЧНОЙ СУШКИ ЗЕРНА
MATHEMATICAL MODELING OF POST-HARVEST GRAIN DRYING**

А.Ф. Рогачев, доктор технических наук, профессор
Д.В. Шатырко, старший преподаватель

A.F. Rogachev, D.V. Shatyрко

Волгоградский государственный аграрный университет

Volgograd State Agricultural University

В статье представлен анализ существующих конструктивно-технологические схемы устройств для сушки зерна, позволяющие снизить неравномерность распределения зернового материала на транспортирующем рабочем органе. С целью совершенствования технологического процесса сушки зерна, авторами разработано техническое решение, частично позволяющее устранить неравномерность распределение зернового материала на транспортирующем рабочем органе. Экспериментальное исследование по определению оптимального режима работы технологического процесса сушки зерна проводилось на разработанном стендовом оборудовании с применением аналого-цифрового преобразователя и программного обеспечения «Power Graph». Выявлялись закономерности влияния линейных скоростей транспортно-технологических органов и рабочего расстояния регулируемой шиберной заслонки. В результате обработки экспериментальных данных с помощью надстройки «Анализ данных» MS Excel получена регрессионная модель зависимостей. Получена поверхность отклика зависимости производительности установки от линейной скорости перемещения зерновой массы и рабочего расстояния регулируемой шиберной заслонки. Неравномерность высухания зерна по плотному неподвижному слою в процессе его вентилирования может быть уменьшена при использовании регулируемой шиберной заслонки.

The article presents an analysis of the existing structural and technological schemes of devices for drying grain that reduce the uneven distribution of grain material on the carrier operating authority. To improve the process of drying the grain authors developed a technical solution is partially eliminates the uneven distribution of the grain material on the carrier operating authority. Pilot study to determine the optimal operation of the grain drying process was carried out on a bench designed equipment using analog-digital converter and software «Power Graph». Identify patterns of influence of linear velocities of transport and technological bodies and working distance adjustable damper. As a result of experimental data processing with the help of add-ons "Data Analysis» MS Excel obtained regression model dependencies. Obtain a response surface based on plant capacity linear velocity of the grain mass and clearance adjustable damper. Uneven drying grain dense fixed bed in the process of ventilation can be reduced by using an adjustable damper.

Ключевые слова: сушка зерна, зерновая масса, экспериментальные исследования, активное вентилирование, агент сушки.

Key words: drying grain, grain weight, experimental studies, active ventilation, drying agent.

Введение. Послеуборочная обработка является обязательным элементом процесса производства зерна, особенно семенного назначения. Климатические условия ЮФО в ряде случаев позволяют проводить уборку зерновых без применения зерносу-

шильного оборудования. При необходимости в ряде хозяйств используют напольные переносные установки или бункера активного вентилирования [3].

Сушка зерна необходима для приведения зерна и семян в устойчивое состояние для их дальнейшего хранения [1]. Важным является повышение эффективности процесса сушки зерна, в частности снижение удельной энергоемкости процесса сушки зерна, улучшение качества готового продукта и сокращения времени сушки [5].

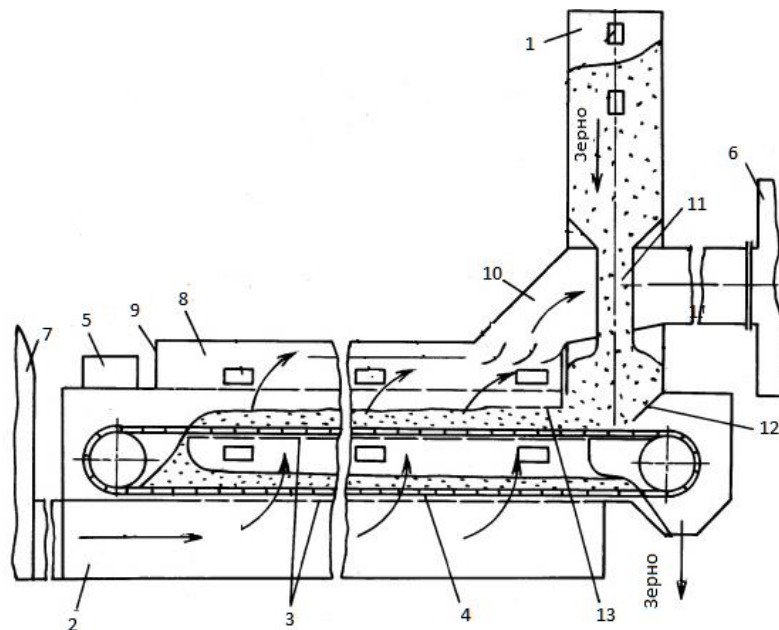


Рисунок 1 – Сушилка конвейерная для зерна:

- 1 – надсушильный бункер, 2 – сушильная камера, 3 – перфорированные основания, 4 – цепочно-планчатый конвейер, 5 – регулируемый механизм привода конвейера, 6 – вентилятор, 7 – теплогенератор, 8 – воздухопровод, 9 – торцевая стенка, 10 – наклонный верх, 11 – трубы, 12 – наклонное днище, 13 – фартук

Материалы и методы. Основным недостатком технологии сушки зерна в конвейерных установках является неравномерность просушки зерна по толщине слоя. В изученных работах ВИЭСХ [1, 10] решалась проблема снижения неравномерности сушки за счёт применения технологии СВЧ воздействия на зерновой слой, реализованный в способе сушке по патенту РФ № 2479982.

На рисунках 1 и 2 представлены конструктивно-технологические схемы известных устройств для сушки зерна.

Рассмотренные схемы позволяют снизить неравномерность распределения зернового материала на транспортирующем рабочем органе.

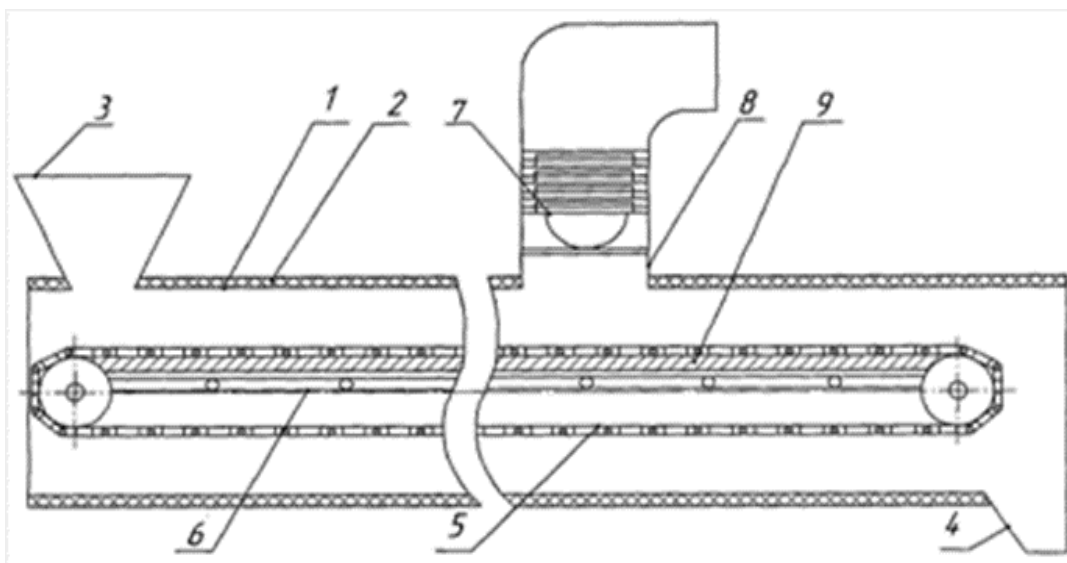


Рисунок 2 – Устройство для сушки зерна на транспортирующем рабочем органе:
1 – кожух прямоугольного сечения, 2 – слой теплоизолирующего материала, 3 – загрузочного бункера, 4 – выгрузного окна, 5 – транспортирующий рабочий орган, 6 – нагревательный элемент, 7 – вентилятор, 8 – воздуховод

Анализ публикаций показал, что эффективной является сушка в тонком слое зерна, в котором толщина слоя соизмерима с диаметром зерна [6, 7, 9]. При этом недостаточно изучено влияние скорости сушки на прогрев зерновой массы при равномерном распределении материала на транспортирующем рабочем органе. С целью совершенствования технологического процесса сушки зерна авторами было разработано техническое решение, частично устраняющее неравномерность распределения зернового материала на транспортирующем рабочем органе. В предлагаемое устройство для сушки зерна [11] включено выравнивающее средство, выполненное в виде регулируемой шиберной заслонки и предназначенное для равномерного распределения зернового материала.

При использовании установок активного вентилирования необходимо управление процессом сушки, предусматривающее определение текущей влажности зерна; определение энергетического потенциала агента сушки; определение требуемой скорости агента сушки [8].

Одной из основных проблем при сушке зерна является потеря тепла вследствие несовершенства технологии сушки, нерационального выбора его режимов вследствие конструктивных недостатков применяемых технических средств.

Математическая модель в виде системы дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса во влажных материалах, учитывающая размер зерновки и коэффициент температуропроводности, а также удельной мощности имеет вид [3]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2}{\partial R^2} + \frac{r \cdot \varepsilon}{c} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau} + \frac{Q_v}{c \cdot p_0} \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial R^2} + a_m \cdot \delta \frac{\partial^2 \Theta}{\partial R^2} + \varepsilon \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau} \\ \frac{\partial P}{\partial \tau} = a_p \cdot \frac{\partial P^2}{\partial R^2} + \frac{\varepsilon}{c_v} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau} \end{cases} \quad (1)$$

где Θ – температура зерновки, $^{\circ}\text{C}$; τ – время, с; a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; R – размер зерновки, мм; r – удельная теплота парообразования, Дж/кг; ε – коэффициент фазового превращения жидкости – пар; c – удельная теплоемкость зерна, Дж/кг; u – влагосодержание тела, %; Q_v – удельная мощность, $\text{Вт}/\text{м}^3$; p_0 – плотность сухого вещества зерна, $\text{кг}/\text{м}^3$; a_m – коэффициент диффузии жидкости, $\text{м}^2/\text{с}$; δ – относительный коэффициент термодиффузии; P – избыточное давление, Па; a_p – коэффициент конвективной диффузии пара, $\text{м}^2/\text{с}$; c_v – емкость тела по отношению к влажному воздуху.

Громоздкость математического описания параметров, входящих в систему (1) потребовала проведения экспериментального, для которого специально разработан стендовое оборудование с применением аналого-цифрового преобразователя «Е-440» и программного обеспечения «Power Graph» (рисунок 3).

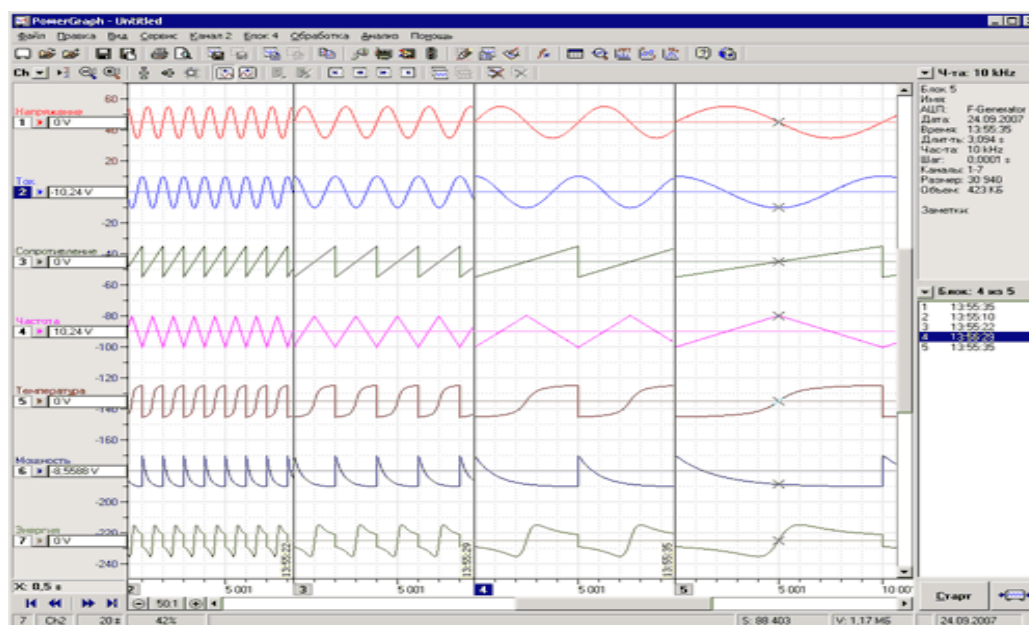


Рисунок 3 – Рабочее окно ПО «PowerGraph» в режиме регистрации параметров

ПО «PowerGraph» предназначено для регистрации, визуализации, обработки и хранения аналоговых сигналов, записанных с помощью различных устройств сбора данных, и позволяет использовать IBM-совместимый ПК в качестве комплексно-измерительно-регистрирующих приборов [3].

В ходе проведения опыта на экране ПЭВМ в режиме реального времени выводились и регистрировались совмещенные графические данные изменения частоты вра-

щения электродвигателей, а также время, затраченное на процесс сушки исследуемого материала (рисунок 4).

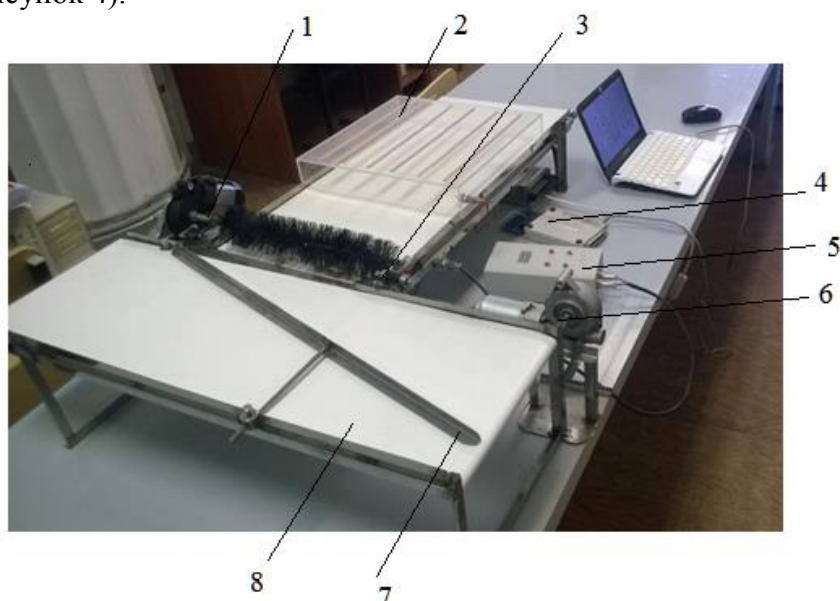


Рисунок 4 – Общий вид стенда для исследования технологического процесса: сушки зерна: 1 – датчик частоты вращения щеточного вала, 2 – сушильная установка, 3 – портативный лазер, 4 – Аналого-цифровой преобразователь Е-440, 5 – блок управления, 6 – датчик частоты вращения конвейера, 7 – направляющая, 8 – транспортирующий рабочий орган

Результаты. С целью экспериментального определения оптимального режима работы технологического процесса сушки зерна, был реализован факторный трехуровневый план Бокса–Бенкина [2], в котором в качестве варьируемых факторов принимались: x_1 – линейная скорость перемещения зерновой массы по конвейеру выдачи, м/с; x_2 – линейная скорость движения транспортирующего рабочего органа, м/с; x_3 – расстояние регулируемой шиберной заслонки, см.

В соответствии с задачами экспериментальных исследований, выявлялись закономерности влияния линейных скоростей конвейеров и рабочего расстояния регулируемой шиберной заслонки стенда с целью обоснования оптимального режима его работы.

В процессе обработки экспериментальных данных регрессионная модель зависимостей, полученных с помощью надстройки «Анализ данных» в MS Excel, принимает вид:

$$Y_1 = 23,553 + 213,229x_1 + 50,416x_2 + 0,552x_3 - 252,083x_1x_2 - 83,333x_1x_3 - 0,002x_2x_3 + 68,75x_1^2 - 0,25x_2^2 - 0,458x_3^2 \quad (2)$$

$$Y_2 = 13,213 + 112,098x_1 + 80,679x_2 + 1,213x_3 + 67,158x_1x_2 - 22,479x_1x_3 + 0,492x_2x_3 + 18,307x_1^2 - 4,190x_2^2 + 0,056x_3^2 \quad (3)$$

Обсуждение. Показатели качества полученной модели – адекватность по F-критерию Фишера, а также значимость основных параметров – по t-критерию Стьюдента, подтверждают ее применимость для обоснования параметров технологического процесса.

Поверхность отклика полученной зависимости доли кондиционного зерна от линейной скорости перемещения зерновой массы и зазора регулируемой шиберной заслонки представлена на рисунке 5.

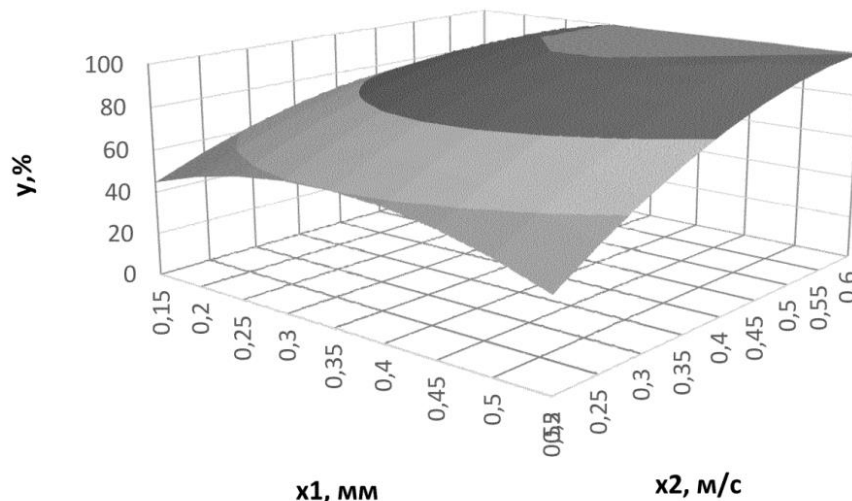


Рисунок 5 – Производительность установки для послеуборочной сушки зерна

Как видно из рисунка 5, наименьшая доля кондиционного зерна наблюдается при минимальном расстоянии шиберной заслонки и наименьшей линейной скорости перемещения зерновой массы. При повышении линейной скорости и рабочего расстояния заслонки, соответственно повышается доля кондиционного зерна.

Заключение. Таким образом, анализ полученных зависимостей позволяет обоснованно выбирать конструктивно-технологические параметры модернизируемого устройства для сушки зерна. Неравномерность высыхания зерна по плотному неподвижному слою в процессе его вентилирования может быть уменьшена при использовании регулируемой шиберной заслонки. Расчетный экономический эффект от реализации усовершенствованной технологии и средств механизации послеуборочной обработки зерна на ОАО «Фермалэнд» Калачевского района составил 990,64 руб. на 1 тонну продукции при номинальной производительности устройства для сушки 10 т/ч при доле кондиционных изделий 86...89 %.

Библиографический список:

1. Васильев, А.Н. Экспериментальное исследование процессов нагрева зерна при СВЧ рециркуляции [Текст] / А.Н. Васильев, Н.Б. Руденко, Д.А. Будников // Механизация и электрификация. – 2011. – № 11. – С. 28-29.
2. Кузнецов, Н.Г. Вводные лекции по математическому моделированию и математической теории эксперимента [Текст]: учебное пособие/ Н.Г. Кузнецов, С.И. Богданов. – Волгоград: Волгоградская ГСХА, 2008. – 182 с.
3. Лыков, А.В. Теория сушки [Текст] / А.В. Лыков. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Издательский центр «Энергия», 1968. – 427 с.
4. Описание ПО «PowerGraph» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.powergraph.ru/soft/pgview.asp> (дата обращения: 20.10.2015 г.)
5. Автоматизированная линия для послеуборочной сушки зерна [Текст]: буклет «Российская агропромышленная выставка «Золотая осень» / А.Ф. Рогачев, А.П. Евдокимов, Д.В. Шатырко /ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ. – М.: Волгоград, , 2014. – 4 с.
6. Рогачев, А.Ф. Оптимизация инновационных проектных решений в продовольственной сфере [Текст] / А.Ф. Рогачев, Д.В. Шатырко // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование – 2015. – № 1(37). – С. 223-228.

7. Рогачев, А.Ф. Использование UML-моделей для исследования и обеспечения информационной безопасности сложных технических систем [Текст] / Рогачев А.Ф., Федорова Я.В. // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование – 2014. – № 4 (36). – С. 236-241.

8. Рогачев, А.Ф. Моделирование и автоматизация синтеза погрузочно-транспортных агрегатов на основе структурных графов [Текст] / А.Ф. Рогачев // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование – 2012. – № 2(24). – С. 165-170.

9. Рогачев, А.Ф. Математическое моделирование и эффективность внедрения технологических инноваций [Текст] / А.Ф. Рогачев, Н.Н. Скитер // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2009. – № 4(16). – С. 109-113.

10. Устройство для сушки корней и корневищ солодки голой CLYCYRRHIZA GLABRA L [Текст]: пат. на изобретение № 2246082 / Салдаев А.М., Нестеренко И.А., Рогачев А.Ф., Галда А.В., Суслаяев А.Л. – опуб. 10.09.2003.

11. Устройство для сушки зерна [Текст]: Заявка на полезную модель № 2015128633 РФ. F26B17/04 / А.Ф. Рогачев, Д.В. Шатырко // Заявл. 14.07.2015 г.

Literature list:

1. Vasilyev, A.N. Experimental study of the processes of heating grain during microwave recycling [Text] / A.N. Vasilyev, N.B. Rudenko, D.A. Budnikov // Mechanization and electrification. – 2011. – № 11. – P. 28-29.

2. Kuznetsov, N.G. Introductory lectures on mathematical modeling and mathematical theory of experiment [Text]: учебное пособие/ N.G. Kuznetsov, S.I. Bogdanov. – City of Volgograd: Volgograd SAA, 2008. –182 p.

3. Lykov, A.V. Theory of Drying [Text] / A.V. Lykov. – 2nd ed. revised. and add. – M.: Publishing House «Energiya», 1968. – 427 p.

4. Software description «PowerGraph» [Electronic resource] – Access mode: <http://www.powergraph.ru/soft/pgview.asp> (date of application: 20.10.2015 г.)

5. Automated line for post-harvest grain drying [Text]: booklet «Russian Agricultural Exhibition «Gold autumn» / A.F. Rogachev, A.P. Evdokimov, D.V. Shatyрко /FSBEI HPE Volgograd SAU. – City of Moscow: Volgograd, 2014. – 4 p.

6. Rogachev, A.F. Optimization of innovative design solutions in the food sector [Text] / A.F. Rogachev, D.V. Shatyрко // News Nizhnevolzhskiy agricultural university complex: Science and Higher Vocational Education. – 2015. – № 1(37). – P. 223-228.

7. Rogachev, A.F. Using UML-models for research and information security complex technical systems [Text] / A.F. Rogachev, Y.V. Feodorova // News Nizhnevolzhskiy agricultural university complex: Science and Higher Vocational Education – 2014. – № 4 (36). – P. 236-241.

8. Rogachev, A.F. Modeling and Automation synthesis of cargo transport units on the basis of structural graphs [Text] / A.F. Rogachev // News Nizhnevolzhskiy agricultural university complex: Science and Higher Vocational Education – 2012. – № 2(24). – P. 165-170.

9. Rogachev, A.F. Mathematical modeling and effectiveness of technological innovation [Text] / A.F. Rogachev, N. N. Skiter// News Nizhnevolzhskiy agricultural university complex: Science and Higher Vocational Education. – 2009. – № 4(16). – P. 109-113.

10. An apparatus for drying the roots and rhizomes of licorice CLYCYRRHIZA GLABRA L [Text]: patent for invention № 2246082 / Saldaev A.M., Nesterenko I.A., Rogachev A.F., Galda A.V., Suslyayev A.L. – published 10.09.2003.

11. An apparatus for drying a grain [Text]: The utility model application № 2015128633 РФ. F26B17/04 / A.F. Rogachev, D.V. Shatyрко // statement 14.07.2015.

E-mail: rafr@mail.ru