

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОЗАТРАТ НА ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ ПРОРОЩЕННОГО ЗЕРНА РЖИ, ТРИТИКАЛЕ И ПШЕНИЦЫ В ВИХРЕВОМ РОТОРНОМ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕ

В. А. ШАРШУНОВ, А. В. ЕВДОКИМОВ

101/16 -mail: mgup@mogilev.by

13.03.2023)

- [1, 2].

'C, A, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>6</sub>, E

'K, Ca, Mg, P, Fe

Z 3]-

[5, 6].

Z].

### Ключевые слова:

*Sprouted grains of various cereal crops can become one of the promising products for obtaining natural food supplements. Sprouted grain is a useful, easily digestible product that contains in its composition a very wide range of useful substances, vitamins (C, A, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>6</sub>, E), minerals (K, Ca, Mg, P, Fe, etc.), trace elements, as well as dietary fiber and has a specific highly effective healing effect on humans and animals.*

*In the process of industrial processing of vegetable raw materials, a significant loss of biologically valuable substances contained in it occurs, which reduces the effect of the use of food additives. Therefore, considerable attention is paid to the development of new methods and equipment for the industrial production of natural high-quality food powders from plant materials. The most important condition for processing is to obtain a product in which all useful substances are in natural and balanced amounts and combinations.*

*The promising directions for improving the technological process include the combination of thermal, mass transfer and mechanical processes in one working space, which ensures the minimum time spent by raw materials in the processing zone.*

*Sgd ot φ nrd re qdr d qbg s sgd DD Adk qt rh mRs sd Tnhudqrhs re Ennc ne Bgd l b k Sdbgmknftr lr sn cdudkro sgd cdsign and justification of the parameters of a vortex rotary grinder that implements this method, which will make it possible to obtain food powders with maximum preservation of biologically active substances.*

**Key words:** *germinated grain, vortex rotary grinder, grinding, energy consumption.*

### Введение

Зерно – живой организм, и его жизнедеятельность напрямую зависит от влажности. Устойчивое хранение зерна возможно только при значениях его влажности, ниже критической, при которой в клетках зерна появляется слабо или совсем не удерживаемая крахмалом и белками влага. Критическое значение влажности для большинства злаков равно 13–15 %. Ее превышение влечет за собой резкое увеличение интенсивности дыхания и других проявлений физиологической активности зерна. В отличие от обычного зерна, пророщенное с влажностью до 45 %, более чувствительно к воздействию повышенных температур в результате чего происходит тепловая денатурации белков, которая влечет за собой снижение хлебопекарных качеств, а при сильном нагреве – полную потерю этих качеств [8, 9].

Пророщенное зерно имеет свои особенности при измельчении. Содержание влаги, состояние и характер взаимодействия ее с частями зерна оказывают существенное влияние на его технологические свойства. Влага проникает в зерновку через всю ее поверхность, хотя и с различной скоростью, однако преобладающее количество влаги проникает в зерновку через зародыш. Поглощенная влага вызывает изменение структуры зерна, и прежде всего эндосперма, появляются внутренние напряжения, увеличивается количество и размеры микротрещин, создаются благоприятные условия для предразрушения зерна. При этом снижаются прочность и твердость зерна, повышается пластичность и уменьшается хрупкость, возрастает сопротивляемость разрушению [10].

Измельчающее устройство для производства тонкодисперсных пищевых порошков из пророщенного зерна должно характеризоваться следующими качествами: высокой интенсивностью измельчения; возможность измельчения высоковлажных материалов; возможность эффективного измельчения материалов с изменяющимися в процессе обработки реологическими характеристиками; измельчение материала должно происходить в основном вследствие его сдвига и среза.

Целью исследований в УО БГУТ является разработка конструкции и обоснование параметров вихревого роторного измельчителя, реализующего этот метод, что позволит получать пищевые порошки с максимальным сохранением биологически активных веществ.

### Основная часть

Выбор способа механического воздействия зависит от физико-механических свойств и размеров измельчаемого продукта [11]. Для мелкого и тонкого измельчения пищевых продуктов, близких по физико-механическим и технологическим свойствам пророщенного зерна злаковых культур, используются устройства, в которых разрушение материала происходит в условиях совмещения чистого среза, удара (стесненного или свободного), сжатия, сдвига. В БГУТ разработаны различные конструкции роторно-вихревых мельниц: с непрерывной проточной классификацией; с газодобросепаратором; с инерционно-гравитационной выгрузкой материала; с боковой продувкой; многокаскадные роторно-вихревые мельницы и т. д. [12].

В УО «БГУТ» разработан и изготовлен вихревой роторный измельчитель (рис.1), в которой влажное термолabile сырье подвергается измельчению в вихревой рабочей камере с последующей досушкой в пневматической трубе [13]. Конструкция установки защищена патентом Республики Беларусь [14].

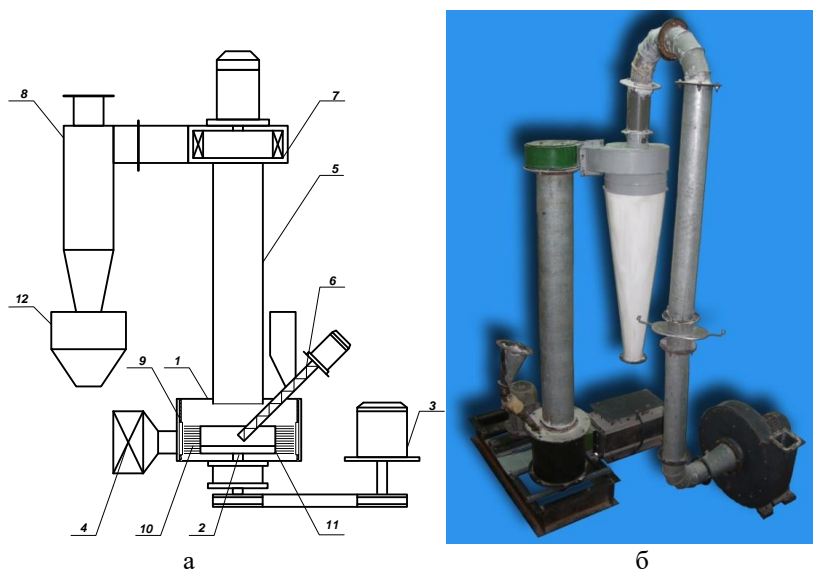


Рис. 1. Вихревой роторный измельчитель для измельчения и досушивания пророщенного зерна ржи, тритикале и пшеницы: а – схема; б – общий вид

Установка (рис. 1, а) содержит вихревую рабочую камеру 1 с установленным в ней роторным измельчителем 2, подключенным к приводу 3, систему подогрева наружного воздуха 4, пневмотрубу 5, питатель 6, вентилятор 7 и систему пылеулавливания высушенного продукта 8. В стенках корпуса вихревой рабочей камеры 1 расположены щелевые каналы 9. Роторный измельчитель 2 выполнен в виде пакета ножей 10, установленных шарнирно в устройстве 11 для изменения угла наклона ножей 10. На рис. 2 приведена принципиальная схема вихревого роторного измельчителя.

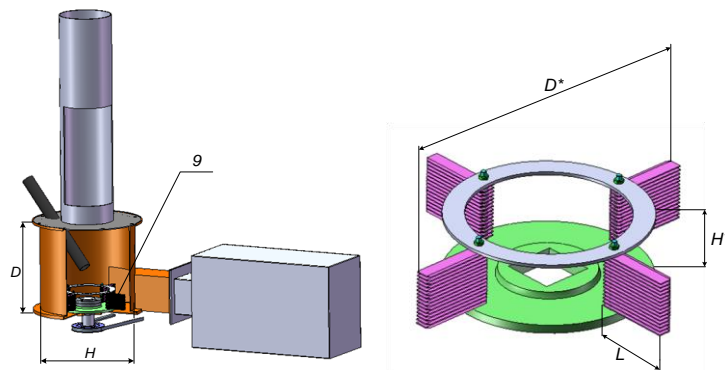


Рис. 2. Схема роторного измельчителя

Питатель 6 устанавливается выходным концом по оси вращения роторного измельчителя 2, что обеспечивает подачу исходного материала в область максимального разрежения и позволяет равно-

мерно распределять его по периметру роторного измельчителя 2 и сразу смешивать материал с подсушенной измельченной фракцией. Пневмотруба 5, подключенная к вихревой рабочей камере 1, заглублена внутрь вихревой камеры 1 с образованием пережимного порога. Вынос материала из камеры осуществляется газовым потоком сушильного агента по воздуховодам 5 через систему пылеулавливания готового продукта 8. Готовый продукт собирается в бункере 12.

Установка работает следующим образом. Наружный воздух, проходя через систему подогрева 4, нагревается до требуемой температуры и поступает в вихревую рабочую камеру 1. Одновременно в вихревую рабочую камеру 1 подается продукт питателем 6. Частицы влажного материала опудриваются частично подсушенным продуктом, теряют свою липкость и попадают на роторный измельчитель 2, где измельчается ножами 10. Образовавшаяся газовзвесь находится в закрученном состоянии и удерживается в виде стационарного кольца, вращающегося у боковой стенки вокруг оси рабочей камеры 1. По мере подсыхания частицы материала выносятся из вихревой рабочей камеры 1 в пневмотрубу 5, где происходит окончательное досушивание материала. Поток газовзвеси попадает непосредственно на вход системы пылеулавливания высушенного продукта 8. Отработанный воздух выбрасывается в атмосферу. Готовый продукт собирается под системой пылеулавливания высушенного продукта в бункере 12. Разрежение в установке создается вентилятором 7.

Увеличение времени пребывания материала в вихревой сушильной камере 1 достигается тем, что воздухопровод 5 заглубляется внутрь вихревой рабочей камеры 1 с образованием пережимного порога. Это препятствует стоку частиц из рабочей камеры 1 по верхней торцевой стенке.

Для проведения экспериментальных исследований в МГУП (сейчас БГУТ) был спроектирован и изготовлен лабораторный стенд, позволяющий изучать процесс механотермической обработки пророщенного зерна и семян [15]. Схема лабораторного стенда представлена на рис. 3.

Разработанный экспериментальный стенд позволял регулировать следующие параметры установки:

- режимно-технологические: температуру подаваемого воздуха; производительность установки; частоту вращения роторного измельчителя; объемный расход воздуха;
- конструктивные: диаметр роторного измельчителя; высоту роторного измельчителя; диаметр выходного отверстия камеры; углы заточки ножей роторного измельчителя.

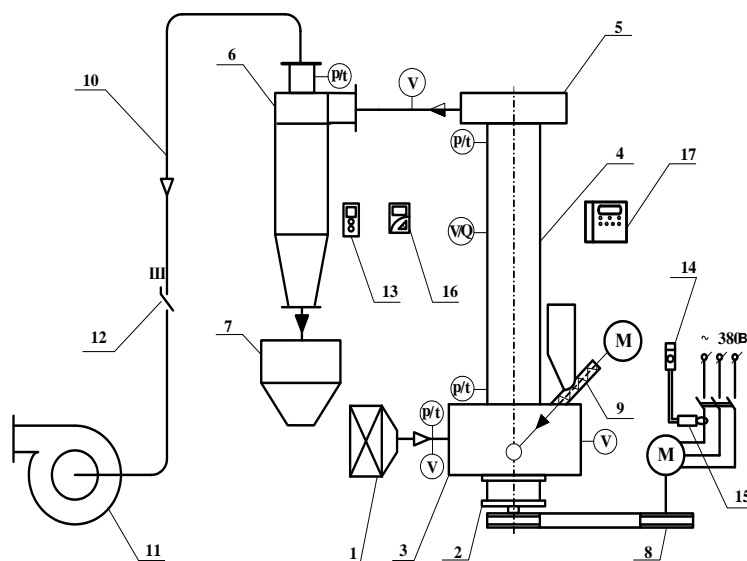


Рис. 3. Схема лабораторного стенда для проведения экспериментальных исследований процесса измельчения пророщенных зерна и семян: 1 – калорифер; 2 – ротор; 3 – рабочая камера мельницы; 4 – пневмотруба; 5 – раскручивающая улитка; 6 – циклон; 7 – приемный бункер; 8 – шкив; 9 – пружинный питатель; 10 система воздухопроводов; 11 – вентилятор; 12 – шиберная заслонка; 13 – анемометр testo – 435; 14 - цифровой мультиметр APPA-109N; 15 – измерительные клещи; 16 – логгер testo 177 – T4; 17 – инвертор (LS600-4003 N)

Обработка экспериментальных данных проводилась в соответствии с требованиями стандартных методик [16, 17, 18], с помощью которых определялись достоверность, точность и другие показатели.

Важнейшим параметром оценки эффективности работы измельчителей является определение потребляемой мощности привода:

$$N_{\text{прив}} = N_{\text{хол}} + N_{\text{изм}}, \quad (1)$$

где  $N_{\text{прив}}$  – потребляемая мощность привода измельчителя, кВт;  $N_{\text{хол}}$  – мощность холостого хода привода, кВт;  $N_{\text{изм}}$  – мощность, затрачиваемая на процесс измельчения, кВт.

Измерение и регистрацию энергозатрат проводили с использованием цифрового мультиметра, обладающего функцией цифрового регистратора APPA – 109N (рис. 4). Мультиметр подключали в цепь питания экспериментальной установки, при помощи которого непосредственно регистрировали показания фазного тока в сети трехфазной системы. С его помощью фиксировалось потребление электроэнергии установкой, а также определялись оптимальных режимов работы измельчителя в зависимости от потребляемой мощности и возникающей силы тока в электрической цепи. Точность измерения прибором постоянного и переменного тока в диапазоне от 0 до 40А составляет 0,001А.

Частотный преобразователь (инвертор) LS600-4003 N (рис.5) применялся для регулирования частоты вращения асинхронного двигателя, который посредством ременной передачи передает крутящий момент на ротор ножевой мельницы, а также для изменения частоты вращения электродвигателя шнекового питателя. Регулирование осуществлялось путем изменения частоты питающего напряжения, что позволяет при неизменном числе пар полюсов электродвигателя, изменять угловую скорость магнитного поля статора.



Рис. 4. Общий вид цифрового мультиметра APPA – 109N с токоизмерительными клещами



Рис. 5. Общий вид инвертора LS600-4003 N

Одним из факторов, влияющих на интенсивность процесса измельчения, является окружная скорость движения роторного измельчителя. С повышением окружной скорости роторного измельчителя возрастает производительность установки и степень измельчения материала. В то же время увеличивается скорость движения воздушно-продуктового слоя в камере измельчителя, что приводит к переизмельчению материала, увеличивается расход энергии на измельчение и холостой ход роторного измельчителя.

Таким образом, увеличение окружной скорости не может быть предельным и существуют оптимальные ее значения для различных схем измельчения и вида перерабатываемых материалов (рис. 6). Начальная влажность зерна составляла  $W = 42\%$ .

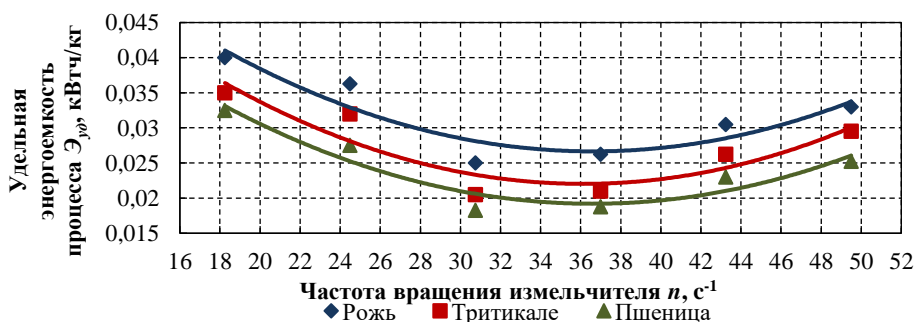


Рис. 6. Влияние частоты вращения роторного измельчителя на энергоёмкость процесса измельчения

Анализ рис. 6 позволяет установить, что с увеличением скорости вращения ротора производительность растет практически по прямолинейному закону, а удельная энергоёмкость для каждого материала сначала снижается и достигает минимального значения при частотах вращения 32–40 с<sup>-1</sup>. При дальнейшем увеличении скорости, удельная энергоёмкость процесса возрастает. Данный вид приведенных графических зависимостей можно объяснить тем, что вначале процесса имеет место ситуация, когда энергия, затрачиваемая на деформацию тела, сочетается в себе вязкий удар и разрушение, а последующее возрастание энергии, после зоны минимальных значений, связано с увеличением момента инерции ротора и как следствие увеличением мощности. Регулирование гранулометрического состава материала можно проводить за счет повышения частоты вращения ротора или увеличения размера помольной камеры и длины ножей. Однако ростом частоты вращения затраты мощности растут в третьей степени, а при увеличении линейных размеров ротора увеличиваются в пятой степени, что необходимо учитывать при определении размеров и режимов работы установки.

На рис. 7 и 8 представлены экспериментальные данные по изменению мощности, требуемой на измельчение в зависимости от количества материала, подаваемого на измельчение и от начальной влажности материала. Данные зависимости получены при следующих фиксированных параметрах:  $n = 30,75 \text{ с}^{-1}$ ;  $t = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ .

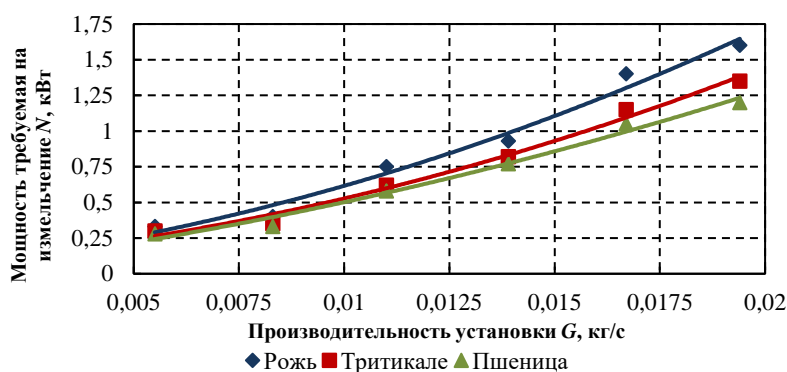


Рис. 7. Изменение мощности, требуемой на измельчение от нагрузки по материалу

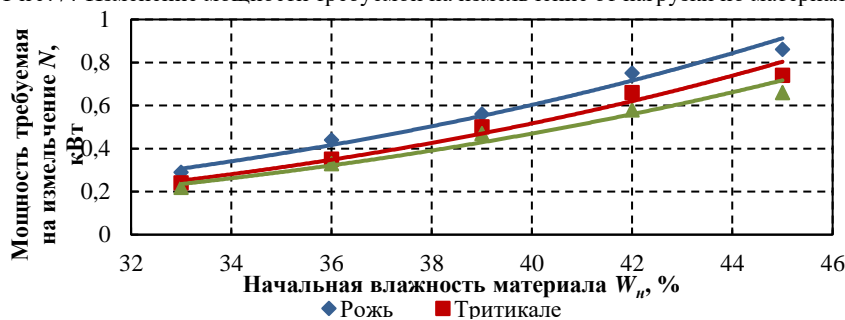


Рис. 8. Изменение мощности, требуемой на измельчение от начальной влажности продукта

### Заключение

Обзор и анализ современных способов измельчения пищевых материалов показал, что выбор механического воздействия напрямую зависит от физико-механических свойств. Исходя из физико-механических свойств продукта в виде пророщенного зерна ржи, тритикале и пшеницы установлено то, что наиболее предпочтительным для переработки вязкопластичных материалов является измельчение, при котором материал подвергается действию сил сдвига и среза в условиях динамического нагружения.

Разработана сушилка-диспергатор, в которой влажное до 45 % сырье в виде пророщенного зерна ржи, тритикале и пшеницы подвергается измельчению в вихревой рабочей камере. Проведены эксперименты по определению энергозатрат на измельчение пророщенного зерна злаковых культур (ржи, тритикале и пшеницы).

1. Зерновые культуры [Электронный ресурс]. – 2021 – Режим доступа: <https://uiverityagro.ru/растениеводство/зерновые-культуры> – Дата обращения 13.01. 2022.
2. Наука, питание и здоровье: сб. науч. тр. В 2 ч. Ч. 1 / под общ. ред. З.В. Ловкис / Науч.-прак. центр Нац. Акад. наук Беларуси по продовольствию. – Минск: Беларуская наука, 2021. – 346 с.
3. De. L. Healthy food healthy life / L. De, D. Tulipa // J. of Global Biosciences. – 2019. № 8(9). \p. 6453-6468.

4. Clark, M. The Role of Diets in Environmentally Sustainable Food Systems / M/ Clark, J. Macdiarmid, A. Jones, J. Ranganathan, M/ Herrero, J Fanzo // Food and Nutrition Bulletin/ – 2020. – № 41(25). –Р. 531–558.
5. Шаршунов, В. А. Биотехнологические приемы повышения эффективности использования зерновых ресурсов Беларуси / В. А. Шаршунов, Е. Н. Урбанчик, Л. А. Касьянова, П. Г. Иванов, О. В. Агеенко // Известия Национальной академии наук Беларуси. Сер. аграр. наук. – 2008. – № 1. – С. 101–106.
6. Шаршунов, В. А. Получение биологически активного зернового продукта на основе смесей пророщенного зерна пшеницы и овса голозерного / В. А. Шаршунов, Е. Н. Урбанчик, А. Е. Шалюта, М. Н.Голдова // Известия Национальной академии наук Беларуси. Сер. аграр. наук – 2016. – № 4. – С. 118–125.
7. Шаршунов, В. А. Разработка направлений совершенствования оборудования для получения порошковых пищевых добавок из пророщенного зерна / В. А. Шаршунов, В. А. Шуляк, А. В. Евдокимов // Известия национальной академии наук Беларуси. Серия аграрных наук. – 2009. – №4. – С. 114–119.
8. Шаршунов, В. А. Сушка и хранения зерна / В. А. Шаршунов, Л. В. Рукшан. – Минск: Мисанта, 2010. – 588 с.
9. Евдокимов, А. В. Влияние режимных и технологических параметров работы сушилки-диспергатора на процесс термомеханической обработки пророщенного зерна /А. В. Евдокимов // Актуальные проблемы и современные технологии производства продуктов питания: сб. труд. Междунар. науч.-практ. конф., Кутаиси 12-13 июня / Гос. ун-т Акакия Церетели; редкол.: М. Силагадзе [и др.]. – Грузия, Кутаиси, 2014. – С.350–353.
10. Шаршунов, В. А. Влияние скорости деформирования и ударного действия нагрузки на структурно – механические характеристики пророщенного зерна / В. А. Шаршунов, Н. Н. Курилович, В. А. Шуляк, А. В. Евдокимов // научная конференция с международно участие: Хранительна наука, техника и технологии 2010: / научни трудове Ун-т по хранит. технологии; редкол.: Г. Вълчев [и др.] – Болгария, Пловдив, 15–16 окт. 2010. – том LVII, Свитък 2 – С. 401 – 407.
11. Борщев, В. Я. Оборудование, для измельчения материалов: дробилки и мельницы: учеб. пособие / В. Я. Борщев. – Тамбов: ТГТУ, 2004. – 75 с.
12. Левданский, А. Э. Высокоэффективные проточные процессы и аппараты / А. Э Левданский, Э. И. Левданский. – Минск: БГТУ, 2001. – 235 с.
13. Шаршунов, В. А. Выбор конструктивно–технологической схемы и обоснование параметров сушилки-диспергатора для производства порошковых пищевых добавок из пророщенного зерна / В. А. Шаршунов, А. В. Евдокимов // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: сборник научных трудов. Вып. 1 / Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, Главное управление образования, науки и кадров, Учреждение образования «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия» ; ред.: В. Р. Петровец [и др.] ; рец.: В. А. Успенский, В. И. Ильин, Гайдуков В. А. – Горки ; БГСХА, 2014. – С. 31–41.
14. Патент на изобретение РБ № 12161 «Сушилка-диспергатор». Заявка №20070942 от 23.07.2007 г. Положительное решение от 26.03.2009 г. Зарегистрирован 21.04.2009 г. Авторы: Шуляк В. А., Евдокимов А. В., Смузенко А. Г.
15. Шаршунов, В. А. Исследование динамики движения элементов роторного измельчителя в сушилке-диспергаторе / В. А. Шаршунов, А. В. Евдокимов, А. Е. Покатилов, В. Н. Попов // Вестник Могилевского государственного университета продовольствия – 2014. – № 2. – С. 97–104.
16. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) / Б. А. Доспехов. – 5-е изд., доп. и перераб. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.
17. Тюрин, Ю. Н. Статистический анализ данных на компьютере / Ю. Н. Тюрин, А. А. Макаров; под ред. В. Э. Фигурнова – М.: ИНФРА-М, 1998. – 528 с.
18. Боровиков, В. П. STATISTICA. Статистический анализ и обработка данных в сфере Windows / В. П. Боровиков. И. П. Боровиков. – Москва: Информационно-издательский дом «Филинь», 2004. – 608 с.