

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА



УДК 631.363

А.А. Наймушин
A.A. Naymushin

ОБОСНОВАНИЕ КОНФИГУРАЦИИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРНА

SUBSTANTIATION OF GRAIN MILLING WORKING BODIES CONFIGURATION

Ключевые слова: молекулярное строение зерна пшеницы, зубчато-роликовый измельчитель, новый рабочий орган.

Поиск высокоэффективного способа измельчения зерна привлекает внимание исследователей более 150 лет. За эти годы было разработано множество видов измельчителей, с различной конфигурацией и принципом воздействия рабочих органов на зерновой материал. Одно остаётся неизменным – выработка продуктов из зерна на дробление и измельчение расходуется до 70% электроэнергии, затрачиваемой всеми технологическими машинами линии. Для решения этой проблемы необходимо продолжать поиск наиболее оптимального способа измельчения зерна с целью создания нового вида мелющего оборудования с высокими показателями производительности, степени измельчения и минимальным расходом электроэнергии на размол. Для решения этой задачи было произведено исследование микроструктуры зерна пшеницы с целью поиска наиболее энергоэффективного способа её измельчения рабочими органами мелющих машин. Разработан новый вид измельчителя, учитывающего пути интенсификации воздействия рабочих органов машины на продукт измельчения, с целью максимального извлечения эндосперма зерна при минимальных энергозатратах. Разработанный измельчитель позволяет производить размол зерновок в клиновидном зазоре пары валец-ротор преимущественно по их толщине. Важно отметить, что зерновка в из-

мельчителе ориентируется бороздкой вверх либо вниз, что создаёт благоприятные условия для максимального их раскрытия и более интенсивного воздействия на них рабочих органов машины с целью максимального извлечения эндосперма.

Keywords: molecular structure of wheat kernel, toothed roller grinder, new working body.

In grain processing about 70% of electrical energy is consumed for grain shattering and fine grinding. For more than 150 years already scientists have been trying to improve those processes, searching for the most optimum grain milling technology and designing new milling equipment with high rates of efficiency, the degree of grinding and the minimum consumption of electrical energy. The study of wheat kernel microstructure was conducted for the purpose of searching for efficient energy-saving grinding technique. A new type of grinder has been developed; the new design takes into consideration the intensification of the working bodies' action on ground products for the purpose of maximum endosperm separation. The proposed grinder enables performing grain grinding in cuneal gap of the coupling "roller-rotor" predominantly according to the grain thickness. It should be mentioned that kernels in the grinder are positioned with crease up or down, and that creates the favorable conditions for grinding and more intensive action of the working tools of the grinder on the grain with the purpose of the highest possible separation of endosperm.

Наймушин Андрей Александрович, аспирант, Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону. Тел.: 950-856-08-35. E-mail: rostovmusic@mail.ru.

Naymushin Andrey Aleksandrovich, Post-Graduate Student, Donskoy State Technical University, Rostov-on-Don. Ph.: 950-856-08-35. E-mail: rostovmusic@mail.ru.

Введение

Измельчение зерна, освоенное с незапамятных доисторических времён и по настоящее время, относится к числу самых энергоёмких и материалоемких технологических процессов. Наиболее часто измельчение производят путём механического разрушения зернового материала ударным или сдавливающим действием на вымольном оборудовании различных конструкций. Несколько миллионов тонн высококачественной стали и около 7-10% всей производимой в мире электроэнергии ежегодно затрачивается на эти процессы [1].

Поиск высокоэффективного способа измельчения зерна привлекает внимание исследователей более 150 лет. За эти годы было разработано множество видов измельчителей, с различной конфигурацией и принципом воздействия рабочих органов на зерновой материал. Одно остаётся неизменным, что при выработке продуктов из зерна на дробление и измельчение расходуется до 70% электроэнергии, затрачиваемой всеми технологическими машинами линии [2]. Для решения этой проблемы необходимо продолжать поиск наиболее оптимального способа измельчения зерна с целью создания нового вида мелющего оборудования с высокими показателями производительности, степени измельчения и минимальным расходом электроэнергии на разمول.

Цель работы – создание измельчителя для зерна нового класса, техническим результатом которого является снижение энергоёмкости процесса измельчения и повышение качества измельчения за один проход продуктом зоны размола.

Задачи:

- 1) исследование микроструктуры зерна пшеницы с целью поиска наиболее энергоэффективного способа её измельчения рабочими органами мелющих машин;
- 2) создание нового вида измельчителя, учитывающего пути интенсификации воздействия рабочих органов машины на продукт измельчения с целью максимального извлечения эндосперма зерна, при минимальных энергозатратах.

Объекты и методы

В настоящее время научились связывать технологические свойства зерна с его биологическим строением: все операции над зерном сводятся к его разделению на составные части.

Прочность оболочек у зерна пшеницы намного выше прочности крахмальной части эндосперма. Это объясняется не совпадающему в геометрическом отношении строением её плодовых оболочек и их взаиморасположением (рис. 1). Поэтому разрывное уси-

лие оболочки у пшеницы меняется более чем в 1,5 раза при изменении направления разрушающего усилия – по толщине или ширине. Безусловно, кинематика взаимодействия плода зерновки с рабочими органами размольных машин будет влиять на удельные энергозатраты процесса измельчения.

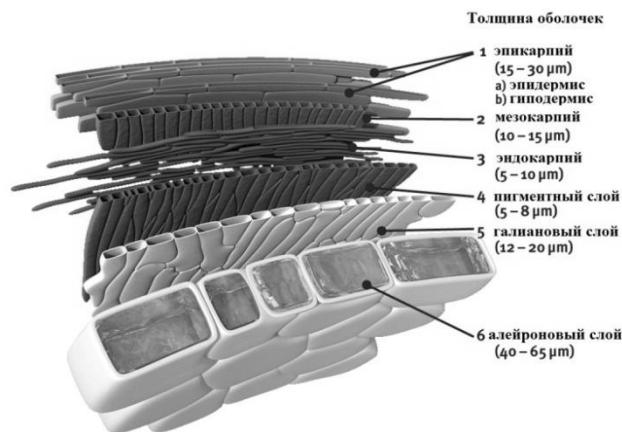


Рис. 1. Строение оболочек зерна пшеницы

В последние десятилетия разрушению зернового материала посвящено множество оригинальных работ, в которых основной акцент сделан на теорию прочности зерна и механизм его разрушения (кинетика разрыва молекулярных связей при упругопластичных деформациях, образование и рост трещин, релаксация напряжений и т.д.) [3].

Большой интерес представляет изучение последствий разрушения эндосперма зерновки при её сжатии в различных направлениях с применением современных электронных микроскопов сканирующего типа.

При проведении исследований использовали зёрна пшеницы ГОСТ 29143-91, влажностью 14%. На рисунке 2 отчетливо видно, что при сжатии зерна по его толщине происходит существенное разрушение его внутренней структуры, особенно на границах раздела крахмальных гранул эндосперма (рис. 2 а). Оболочка при этом оказывает как бы распирающее действие, за счёт своих прочностных свойств, тем самым высвобождая гранулы крахмала. При сжатии зерновки по ширине последствия применения фиксированных разрушающих усилий будут иметь менее выраженный характер (рис. 2 б). Это обусловлено влиянием бороздки зерна на процесс её разрушения. При сжатии зерна по толщине происходит как бы разворачивание оболочек плода. Бороздка в данном случае упрощает задачу, т.к. проникает глубоко в тело зерновки, тем самым ослабляя её прочность. Особенно характерно, что при таком способе воздействия разрушающего усилия на плод зерновки происходит максимальное разделение крахмальных гранул эндосперма

зерновки, и это отчётливо просматривается при микроскопическом исследовании плода (рис. 2 а).

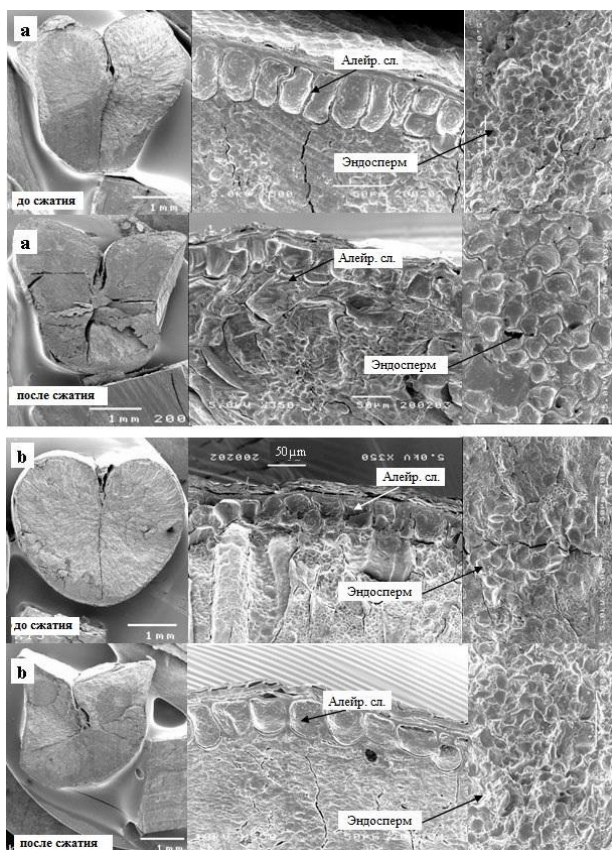


Рис. 2. Последствия разрушения эндосперма зерновки при сжатии:
а – по толщине (бороздке); б – по ширине

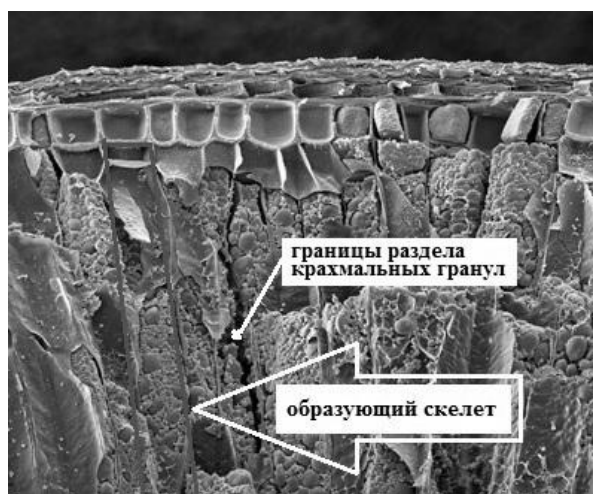


Рис. 3. Поперечный срез зерновки пшеницы.
Увеличение 100 Мкм

Рассмотрев микроструктуру зерна пшеницы при помощи растрового метода электронной сканирующей микроскопии, можно выделить в её теле образующий скелет, представляющий собой ткань (целлюлозной или гемицеллюлозной природы), прочно со-

единённый с оболочками клеток алейронового слоя, пронизывающего плод по всей его толщине и имеющего прямоугольную форму, к внутренней стороне которого прочно прикреплены крахмальные зёрна эндосперма (рис. 3). Такое внутреннее упорядоченное строение зерновки обеспечивает ей не только прочность, но и лёгкое проникновение питательных веществ во время роста и созревания мелкого плода, через микрокапиллярную систему. Эластичность ткани скелета обеспечивает не только беспрепятственный рост крахмальных зёрен, но и правильную ориентацию их во время развития и созревания плода, в процессе его формирования.

Крахмальные зёрна эндосперма зерна располагаются в полостях скелета зерновки, с которым они прочно связаны молекулярными связями. Раскалывание зерновки происходит преимущественно по плоскостям соприкосновения крахмальных зёрен эндосперма, при этом, как уже было сказано выше, большое значение имеет направление приложения разрушающих усилий (рис. 3).

Данные факты дают возможность понять, каким образом необходимо воздействовать на зерно рабочими органами измельчителя, с целью максимального извлечения эндосперма и снижения удельной работы измельчения. При этом можно сделать выводы, почему измельчение зерновки лучше производить по её толщине: т.к. её скелет в данном случае будет иметь вертикальную ориентацию, по отношению к рабочим органам измельчителя, тем самым, деформируясь от нагрузок, будет способствовать высвобождению крахмальных зёрен. Бороздка в данном случае будет также способствовать раскрытию «развёртыванию» оболочек плода, тем самым высвобождая эндосперм и не мешая прямому воздействию на него рабочими органами машины.

Исходя из проведённого микроструктурного анализа зерна, можно сделать вывод, что измельчение зерна рабочими органами измельчителей целесообразно производить по его толщине.

Обоснование конфигурации рабочего органа измельчителя. На рисунке 4 приведён способ контактного взаимодействия зерна с рабочими органами проектируемого измельчителя, которые выполнены в виде цилиндрических поверхностей, как в вальцовом станке, но одна из них – внешняя поверхность цилиндра с нанесёнными на неё рифлями, а другая – внутренняя.

Очевидно, что процесс измельчения зерна в данной схеме будет в значительной мере отличаться от способа контактного взаимодействия зерна с рабочими органами вальцового станка – мелющими вальцами.

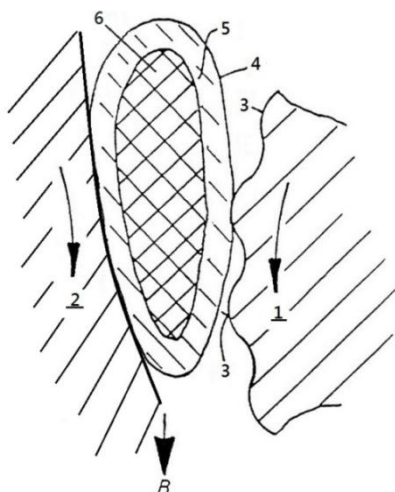


Рис. 4. Способ контактного взаимодействия зерна с рабочими органами проектируемого измельчителя:
1 – ролик; 2 – цилиндрическая опорная поверхность; 3 – рифли; 4 – зерновка; 5 – плодовые оболочки; 6 – крахмалистый эндосперм; В – измельченный продукт

После захвата зерновки в клиновидном зазоре разрабатываемого рабочего органа измельчителя начнётся процесс упругой и пластической деформации (рис. 4). Основная идея данного рабочего органа заключается в том, чтобы ориентировать тело зерновки в клиновидном мелющем зазоре бороздкой вниз, либо вверх – наиболее слабому сечению плода [4].

Рассмотрим более детально процесс кинематического взаимодействия зерна с двумя цилиндрическими поверхностями. Основные варианты расположения зерновки на внутренней опорной цилиндрической поверхности представлены на рисунке 5.

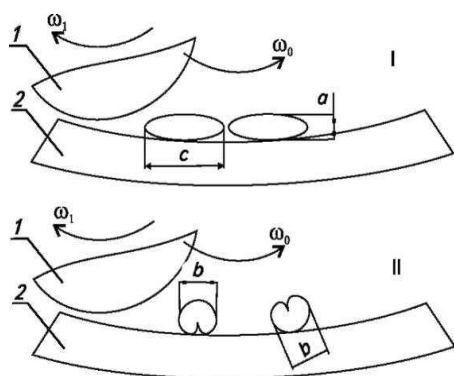


Рис. 5. Варианты расположения зерновки между двумя цилиндрическими поверхностями:
1 – ролик; 2 – цилиндрическая опорная поверхность; а, b и с – соответственно, ширина, толщина и длина зерновки

Особенности строения зерновки таковы, что она может располагаться между двумя цилиндрическими поверхностями по вариантам I или II, приведенным на рисунке 5

бороздкой вверх, либо вниз, что соответствует наиболее оптимальному кинематическому способу её взаимодействия с рабочими органами проектируемого измельчителя.

Реализация полномасштабной установки.

На рисунке 6 представлен общий вид нового измельчителя, спроектированного и изготовленного на кафедре МАПП Донского государственного технического университета, где 1 – входной патрубок; 2 – заслонка; 3 – корпус измельчителя; 4 – пассивный ротор; 5 – ось пассивного ротора; 6 – пружины, за счёт которых регулируется усилие сжатия продукта размола; 7 – упорная планка; 8 – винты, регулирующие натяжение пружин; 9 – направляющие для пружин и упорной планки; 10 – направляющая оси пассивного ротора; 11 – винты, регулирующие зазор; 12 – впадины пассивного ротора; 13 – выпускной патрубок; 14 – ось ролика; 15 – ролик; 16 – торцовая шайба; 17 – вал активного ротора; 18 – активный ротор.

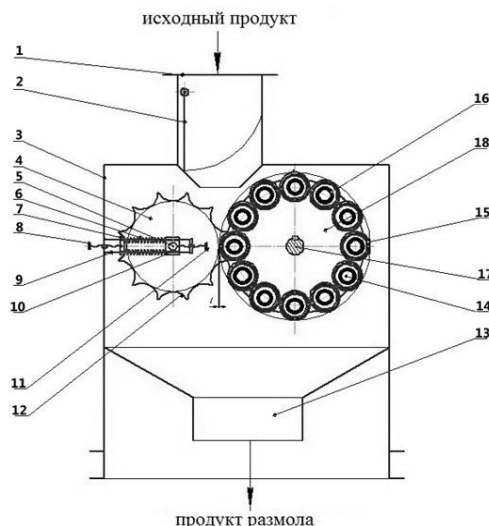


Рис. 6. Общий вид зубчато-роликового измельчителя для зерна

Измельчитель работает следующим образом.

Исходный продукт из патрубка 1, служащего для его подачи, дозированно заслонкой 2 подается во впадину пассивного ротора 12, приводимого во вращение роликами 15 через слой измельченного продукта. Степень измельчения регулируется установкой зазора / винтами 11 и затяжкой пружин 6 винтами 8 через упорную планку 7, перемещаемую по направляющим 9.

В момент входа ролика 15 в зацепление с впадиной 12, заполненной продуктом, происходят постепенное сжатие зерновок и их ориентирование в клиновидном зазоре измельчителя. Длина зоны измельчения в данном случае составляет длину полуокружности впадины 12 пассивного ротора 4, что значи-

тельно превышает аналогичный показатель парноработающих валцов [5].

Силы сдвига возникают вследствие торможения роликов 15 торцовыми шайбами 16 так, что в зерне, в особенности в эндосперме, возникают деформации сдвига. Это означает, что увлажнённое зерно по гладкой впадине 12 пассивного ротора 4 с трудом проскальзывает из-за своей резиноподобной оболочки, а мелющим роликом 15 с рифлями, как известно, перемещается. По мере роста нагрузки измельчения и в момент прохода оси 14 роликом 15 линии, соединяющей центры роторов, зерно со стороны гладкой впадины пассивного ротора почти не перемещается, а со стороны активного ротора преодолевает усилие торможения рефлёного ролика 15 торцовыми шайбами 16, что при максимальных нагрузках приводит к его провороту на оси 14.

Это способствует интенсивной прокатке продукта, наличию оптимальных сдвиговых деформаций, необходимых для качественного измельчения зернового материала во впадине валец-ротор зубчато-роликового измельчителя и даёт возможность регулировать момент вращения роликов, расположенных на активном роторе машины.

Этим и достигается повышение качества измельчения за один проход продуктом зоны размола и, как следствие, снижение энергоёмкости процесса измельчения в целом.

Экспериментальная часть

Фото опытного образца зубчато-роликового измельчителя для зерна представлено на рисунке 7.

При проведении исследований применялось исходное зерно ГОСТ 29143-91 со средним размером зёрен пшеницы $D_{cp.} = 0,0038$ м и влажностью 14%. Диапазон установки зазоров в паре валец-ротор: 1,0; 0,5; 0,25 мм. Средневзвешенный диаметр и гранулометрический состав измельченных частиц определялся по результатам ситового анализа по общепринятым методикам комбикормового и мукомольного производства. В опытах применялся блок из трех стандартных сит следующих размеров: верхнее сито № 09, среднее сито № 06, нижнее сито № 028. Скорость вращения роторов измельчителя регулировалась вариатором.

Для первого пропуска продукта рифленые валцы активного ротора измельчителя установили с параметрами: количество рифлей на 1 см – 4,0; уклон рифлей – 5%, для второго пропуска продуктов размола – через измельчитель: количество рифлей на 1 см – 6,5; уклон рифлей – 5%, для последнего пропуска продуктов размола – через измельчитель: количество рифлей на 1 см – 8,5; уклон рифлей – 5%.



Рис. 7. Фото опытного образца зубчато-роликового измельчителя для зерна

Результаты и их обсуждение

Процесс измельчения является наиболее рациональным при вращении роторов машины с постоянной угловой скоростью $\omega = 15,1$ с⁻¹, в диапазоне установки мелющих зазоров: 1,0; 0,5; 0,25 мм и продолжительности взаимодействия рабочих органов измельчителя (пары валец-ротор) с продуктами размола не более $t \approx 0,2$ с. Оптимальное количество исходного зерна пшеницы во впадине валец-ротор измельчителя составляет от 15 до 30 шт. (масса от 0,5 до 1 г) или порция продуктов размола в том же объеме.

Получен продукт размола, расчётные значения модулей помола которого, определяемые по общепринятым методикам комбикормового и мукомольного производства, составили: $M_1 = 0,8$ мм; $M_2 = 0,51$ мм; $M_3 = 0,34$ мм, что соответствует ГОСТ 8770-58 при трёхкратном пропуске продуктов измельчения через машину.

Энергозатраты на измельчение составили от 520 до 390 Дж · кг⁻¹, в зависимости от технологического зазора в паре валец-ротор машины и повторных проходов продуктов размола зоны измельчения [6]. В соответствии с литературными данными [7] энергозатраты на измельчение 1 кг зернового материала, на жерновых и вальцовых размольных станках с учётом заданных степени и качества измельчения, составляют порядка $5,9 \cdot 10^4 \pm 116$ Дж · кг⁻¹.

Таким образом, процесс разрушения зернового материала при помощи зубчато-роликового измельчителя позволяет получить при меньшем количестве размолов продукт

качества, соответствующего ГОСТ 8770-58, и в связи с сокращением количества размоллов является менее энергозатратным. Это объясняется тем, что:

1) в разработанном зубчато-роликовом измельчителе при диаметре мелющих роликов 30 мм размол идет примерно на половине длины их окружности и составляет около 45 мм, что почти в шесть раз больше, чем у вальцового станка. Этим достигается повышение качества измельчения за один проход продуктом зоны размола;

2) рабочий орган зубчато-роликового измельчителя позволяет производить измельчение зерновки в клиновидном мелющем зазоре измельчителя бороздкой вниз либо вверх — наиболее слабому своему сечению, что является оптимальным вариантом для максимального её разворачивания, извлечения и измельчения эндосперма;

3) указанные особенности конструкции машины позволяют уменьшить её массу, следовательно, себестоимость.

Библиографический список

1. http://www.chem.msu.su/rus/history/R_ehbinder/20.html.
2. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. — Т. 2. — 7-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1992. — 784 с.
3. Schonert K. Advances in the physical fundamentals of comminution. In: Advances in mineral processing, 1986. Littleton, P. 28.
4. Куприц Я.Н. Физико-химические основы размола зерна. — 1946. — 40 с.

5. Соколов А.Я. Технологическое оборудование предприятий по хранению и переработке зерна. — М.: Колос, 1984. — 245 с.

6. Наймушин А.А. Экспериментальное исследование процесса измельчения зерна на зубчато-роликовом измельчителе // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. — 2013. — № 12.

7. Чеботарёв О.Н., Шаззо А.Ю., Мартыненко Я.Ф. Технология муки, крупы и комбикормов. — М.: ИКЦ «Март»; Ростов-н/Д, 2004.

References

1. http://www.chem.msu.su/rus/history/R_ehbinder/20.html.
2. Anur'ev V.I. Spravochnik konstruktora-mashinostroitelya: V 3 t.: T. 2. — 7-e izd., pererab. i dop. — M.: Mashinostroenie, 1992. — 784 s.
3. Schonert K. Advances in the physical fundamentals of comminution. In: Advances in mineral processing, 1986. Littleton, P. 28.
4. Kuprits Ya.N. Fiziko-khimicheskie osnovy razmola zerna. — M.: Zagotizdat, 1946. — 40 s.
5. Sokolov A.Ya. Tekhnologicheskoe oborudovanie predpriyatii po khraneniyu i pererabotke zerna. — M.: Kolos, 1984. — S. 245.
6. Naimushin A.A. Eksperimental'noe issledovanie protsessa izmel'cheniya zerna na zubchato-rolikovom izmel'chitele // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. — 2013. — № 12.
7. Chebotarev O.N., Shazzo A.Yu., Martynenko Ya.F. Tekhnologiya muki, krupy i kombikormov. — M.: IKTs «Mart», Rostov-n/D, 2004.



УДК 631.171:621.78

А.А. Багаев, В.Г. Резинов, Ц.И. Калинин, В.Г. Горшенин
A.A. Bagayev, V.G. Rezinov, Ts.I. Kalinin, V.G. Gorshenin

ЛИНЕАРИЗОВАННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОДНОГО ВОДОНАГРЕВАТЕЛЯ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ ТОКУ И НАПРЯЖЕНИЮ

LINEARIZED MATHEMATICAL MODEL OF DYNAMIC PROPERTIES OF DIRECT-FLOW ELECTRODE WATER HEATER BY ELECTRIC CURRENT AND VOLTAGE

Ключевые слова: электродный нагреватель воды, передаточная функция, математическая модель, линеаризация.

Существенным недостатком технических средств электродного нагрева, используемых в настоящее время, является невозможность обеспечения ими максимальной теплопроизводительности и минимальных затрат электроэнергии в процессе функционирования. Для устранения указанного недостатка требуется разработка замкнутой

по температуре нагреваемой воды системы регулирования, определение типа регулятора и его синтез. Целью статьи является получение линеаризованной математической модели динамических свойств проточного электродного водонагревателя по электрическому току и напряжению для последующего синтеза регулятора и формулирования законов регулирования микроконтроллера. Решение исходной модели осложняется наличием двух нелинейностей: первой является квадратичная зависимость мощности электродного водонагревателя