

Учреждение образования  
"Могилевский государственный университет продовольствия"

УДК 664.66.032.1

ХАРКЕВИЧ  
Виталий Геннадьевич

ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ ВЫСУШЕННЫХ ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ  
В УСТРОЙСТВАХ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ С МНОГОЗВЕННЫМИ  
РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.18.12 – Процессы и аппараты пищевых производств

Могилев, 2010

Работа выполнена в учреждении образования  
"Могилевский государственный университет продовольствия"

Научный руководитель

**Шулик Виктор Анатольевич**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой прикладной механики  
учреждения образования "Могилевский  
государственный университет продовольствия"

Официальные оппоненты:

**Мазур Анатолий Макарович**

доктор технических наук, ведущий  
научный сотрудник научно-исследовательской  
лаборатории тракторов, мобильных систем и  
оборудования Белорусского национального  
технического университета

**Сиваченко Леонид Александрович**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры строительных, дорожных,  
подъемно-транспортных машин и оборудования  
государственного учреждения высшего  
профессионального образования "Белорусско-  
Российский университет"

Оппонирующая  
организация

Республиканское унитарное предприятие  
"Научно-практический центр Национальной  
академии наук Беларуси по продовольствию"

Защита состоится 2 марта 2010 г. в 15<sup>00</sup> на заседании Совета по защите диссертаций Д 02.17.01 в учреждении образования "Могилевский государственный университет продовольствия" по адресу: 212027, Республика Беларусь, г. Могилев, проспект Шмидта, 3, корп. 2, ауд. 206. E-mail: [mti@mogilev.by](mailto:mti@mogilev.by), телефон ученого секретаря (8-0222) 45-35-41, факс (8-0222) 48-00-11.

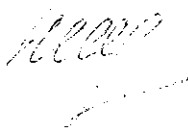
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования "Могилевский государственный университет продовольствия".

Автореферат разослан 29 января 2010 г.

Ученый секретарь

Совета по защите диссертаций

к.т.н., доцент



Т.И. Пискун

## ВВЕДЕНИЕ

Хлебопекарная отрасль является одним из важнейших стратегических звеньев агропромышленного комплекса Республики Беларусь. Наше государство ведет постоянную работу, направленную на сбор, хранение и переработку собранного урожая, обеспечивая его минимальные потери. На современных хлебопекарных предприятиях важнейшее значение имеет полная реализация произведенных хлебобулочных изделий. Анализ объемов производства в хлебопекарной промышленности по Могилевской области и по республике в целом показал, что на практике, из-за возросших требований потребительского рынка, в настоящее время от 1 до 9% хлебобулочных изделий возвращается предприятиями торговли и подвергается вторичной переработке. Продукты переработки черствых хлебобулочных изделий используют:

- в приготовлении теста;
- в производстве панировочных сухарей;
- при создании новых видов хлебных изделий.

Переработка черствого хлеба, идущего на мочку, для последующего приготовления теста никакого экономического эффекта не приносит, в то время как производство панировочных сухарей является экономически оправданным, рентабельность которого составляет не менее 5%. Однако исследованию вопроса переработки черствых хлебобулочных изделий в панировочные сухари до сих пор не уделялось должного внимания.

В настоящее время на хлебопромышленных предприятиях Республики Беларусь для измельчения высушенных хлебобулочных изделий используются различные дробильные машины, которые не учитывают специфичности переработки хлебобулочных изделий. Создание новых специализированных машин для переработки (измельчения) высушенных хлебобулочных изделий требует знания структурно-механических характеристик измельчаемого продукта, характера взаимодействия мелющих тел с объектом измельчения, закономерности движения как продукта, так и рабочих органов.

Вместе с тем при создании новых устройств необходимо максимально минимизировать затраты энергии на ведение процесса. Только безотходное производство, сочетающееся с высоким качеством продукта и обеспечивающее наименьшие затраты, может гарантировать конкурентоспособность выпускаемой продукции. Поэтому работы, связанные с переработкой черствых хлебобулочных изделий, являются весьма актуальными.

Актуальность проведенных исследований подтверждается также тем, что полученные результаты могут быть использованы в смежных отраслях пищевой промышленности. Это позволяет создать конкурентоспособное измельчающее оборудование и на его основе разработать новые технологии переработки хлебобулочных изделий и сопутствующих материалов (тмин, кориандр, семечки, орехи и другие), расширить ассортимент пищевых продуктов, выпускаемых с применением пищевых порошков, повысить их вкусовые характеристики.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами.** Диссертационная работа выполнена в рамках тематики научных исследований УО "МГУП" ГБ 21-22 "Исследование процессов резания и измельчения пищевых материалов", № гос. рег. 20013263; ГБ 26-21 "Интенсификация процессов переработки пищевого сырья, совершенствование конструкций и методов расчета основного технологического оборудования для пищевой промышленности", № гос. рег. 2006748; задания 43 государственной комплексной программы научных исследований "Тепловые процессы" на 2006–2010 гг. ГЗ 06-02 "Исследование технологии сушки и тепломассопереноса в процессах получения тонкодисперсных пищевых порошков", № гос. рег. 20062404; договора с Институтом технологии металлов НАН Б на 2007–2009 гг. ХД 2007 – 24/МГ2 – 03 "Сушка и измельчение вторичных топливных ресурсов перед прессованием", № гос. рег. 20073342; договора с РУПП "Могилевхлебпром" на 2008 г. ХД 2008 – 19 "Разработка проектной документации на оборудование для вторичной переработки хлеба".

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является исследование процесса измельчения высушенных хлебобулочных изделий в устройствах ударного действия с многозвенными рабочими органами.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- на основе анализа конструкций и тенденций развития измельчающего оборудования выбрать приоритетный класс машин, выявить их достоинства и недостатки, а также пути и направления их совершенствования;
- сформировать критерии создания новых машин, на основе которых разработать и создать новую специализированную конструкцию измельчителя для вторичной переработки высушенных хлебобулочных изделий;
- теоретически исследовать динамику движений и взаимодействие измельчаемого материала и ударных элементов и получить уравнения, позволяющие, в зависимости от поставленной задачи, исследовать процесс ударного разрушения измельчаемого материала;
- выполнить комплекс экспериментальных исследований по определению основных физико-механических характеристик исходного материала;
- исследовать важнейшие параметры, характеризующие гидродинамическую обстановку в объеме измельчителя, и установить влияние

основных технологических параметров, расходных характеристик и режимов работы на качественный состав готового продукта (сухарей панировочных);

- изготовить, провести опытно-промышленную проверку и внедрить в производство промышленные измельчители для получения качественных пищевых порошков.

Объектом исследования являются высушенные хлебобулочные изделия и оборудование для его переработки в пищевые порошки. Предметом исследования является математическое и физическое моделирование с использованием стандартных методик, современной компьютерной техники и соответствующих приборов для измерения и контроля исследуемых параметров.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- Закономерности статического деформирования и разрушения образцов разных сортов высушенных хлебобулочных изделий из пшеничной и ржаной муки (показатели структурно-механических свойств: коэффициент Пуассона, предел прочности и предельные деформации при растяжении и сжатии, модуль упругости и сдвига) в зависимости от их влажности (от 2 до 12%).

- Теоретические уравнения движения трехзвенных ударных элементов и измельчаемого материала, позволяющие определять текущие углы, скорости и ускорения любого звена рабочего органа, а также устанавливать момент их взаимодействия и размер отделяемого куска. Результаты экспериментальных исследований геометрических, кинематических, технологических и энергетических параметров измельчителя, их оптимальные значения при переработке высушенных хлебобулочных изделий.

- Результаты экспериментальных исследований степени измельчения в зависимости от числа ярусов ударных элементов (от 1 до 8) и сортности измельчаемого материала.

- Новые экспериментальные данные по:

- затратам мощности на ведение процесса измельчения, КПД и их связи с технологическими и кинематическими параметрами процесса;

- распределению полей скоростей газового потока по различным сечениям камеры измельчения и гидравлическому сопротивлению аппарата;

- удерживающей способности по твердой фазе и среднему времени пребывания материала в объеме рабочей камеры.

**Личный вклад соискателя.** Диссертация является самостоятельной научной работой, обобщающей результаты теоретических и экспериментальных исследований, в реализации которых соискатель принял непосредственное участие.

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты исследований, включенные в диссертацию, были представлены и доложены на: Республиканской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и студентов "Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности" – Могилев, ГУ ВПО "Белорусско-Российский университет", 2005, 2006 гг.; Международной научно-технической конференции "Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии" – Могилев, ГУ ВПО "Белорусско-Российский университет", 2005, 2006, 2007 гг. (за лучший доклад участника международной научно-технической конференции в 2007 г. автор награжден грамотой); Международной научно-технической конференции "Техника и технология пищевых производств" – Могилев, УО "Могилевский государственный университет продовольствия", 2005, 2007, 2009 гг.; Международной научной конференции студентов и аспирантов "Техника и технология пищевых производств" – Могилев, УО "Могилевский государственный университет продовольствия", 2006, 2008 гг.; Международной научно-практической конференции "Проблемы интенсификации интеграции науки и производства" – Бухара, БухТИПиЛП, 2006 г.; постоянно действующей выставке научно-технических работ студентов и аспирантов вузов Республики Беларусь – Минск, БГУИР, май-июнь 2006 г. (за активное участие в выставке автор награжден дипломом Министерства образования Республики Беларусь); Всероссийской конференции молодых ученых с международным участием "Пищевые технологии" – Казань, Казанский государственный технологический университет, 2007 г.; Международной научной конференции молодых ученых "Молодежь в науке – 2007" – Минск, Национальная академия наук Беларуси, 2007 г.

**Опубликованность результатов диссертации.** Количество публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, составляет 1,86 авторских листа (5 статей). Кроме этого по теме диссертации опубликовано 21 печатная работа, в том числе 1 статья в сборнике тезисов докладов, 19 тезисов докладов и 1 патент Республики Беларусь. Также основные результаты диссертации включены в четыре отчета по НИР и одну монографию.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из титульного листа, оглавления, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объем диссертации составляет 180 страниц, в том числе 95 иллюстраций на 45 страницах, 5 таблиц на 2 страницах, 9 приложений на 33 страницах, 140 наименований использованных библиографических источников на 12 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлен обзор современных способов измельчения пищевых материалов, сравнительный анализ которых показал, что выбор механического воздействия напрямую зависит от физико-механических свойств и размеров измельчаемого продукта. Исходя из структурно-механических свойств продукта выявлено, что наиболее предпочтительным для переработки хрупких материалов является измельчение свободным ударом.

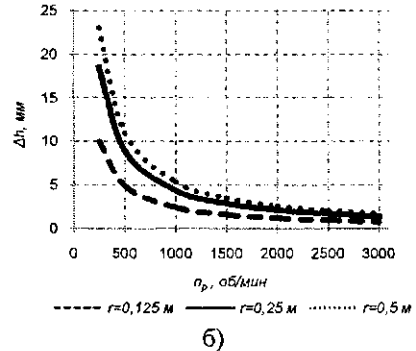
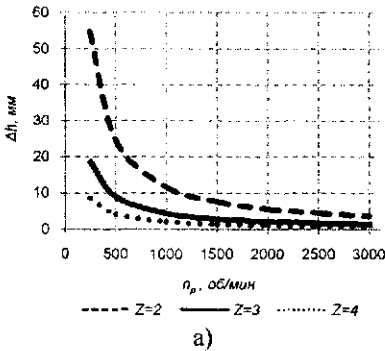
Установлено преимущество дробилок ударного действия перед другими типами установок такого класса для получения тонкодисперсных пищевых порошков. На основе анализа научно-технической информации установлено, что дробилки ударного действия с вертикальным расположением вала являются перспективным видом технологического оборудования для переработки высушенных хлебобулочных изделий. В основу конструкции данных аппаратов положен принцип многоярусной дробилки ударного действия с вертикальной осью вращения рабочего органа. Как показывает опыт эксплуатации, одним из наиболее совершенных способов ударного дробления является применение дробилок с многозвенными ударными элементами. Это объясняется тем, что при случайном попадании в корпус дробилки посторонних предметов (недробимых или трудно дробимых), шарнирная подвеска ударных элементов позволяет избежать больших деформаций, что в свою очередь повышает надежность работы.

На основе анализа конструкций, экспериментальных и теоретических данных сформулированы цели и задачи исследований, сформированы критерии создания и разработан новый измельчитель "ИХ-500" для переработки высушенных хлебобулочных изделий в панировочные сухари.

**Вторая глава** посвящена расчетно-теоретическим исследованиям.

С целью оптимизации попадания измельчаемого материала (батона) в зону удара были определены его законы движения и проведен анализ траекторий движения по подающему лотку и в свободном полете. Полученные зависимости позволили определить рекомендуемую скорость транспортера, угол наклона загрузочного лотка, скорость измельчаемого материала в момент удара о била, а также оптимальное расстояние от лотка до верхнего яруса бил и радиальные размеры рабочей камеры.

На рисунке 1, а представлена зависимость величины отрубаемого куска  $\Delta h$  от частоты вращения ударных элементов при расстоянии от центра вращения до рассматриваемой точки на биле  $r = 0,25$  м и различном количестве ударных элементов в одном ряду  $Z$ , а на рисунке 1, б - при количестве ударных элементов  $Z = 3$  и различном расстоянии от центра вращения до рассматриваемой точки на биле  $r$ .



**Рисунок 1 – Зависимость величины отрубаемого куска  $\Delta h$  от частоты вращения ударных элементов**

Анализ кинематических и геометрических параметров (рисунок 1) позволил установить, что основное разрушение материала происходит в верхних рядах ударных элементов, а в последующих – его доизмельчение до размера требуемой фракции, что в дальнейшем подтвердилось проведенными экспериментальными исследованиями, изложенными в главе 4.

Кроме этого можно констатировать, что  $\Delta h$  в большей степени зависит от числа ударных элементов в ряду  $Z$  и от их частоты вращения  $n_p$ , чем от увеличения радиуса ударных элементов  $r$ . Следовательно, увеличение габаритов измельчителя свыше 250 мм практически не оказывает никакого существенного влияния на изменение величины  $\Delta h$ .

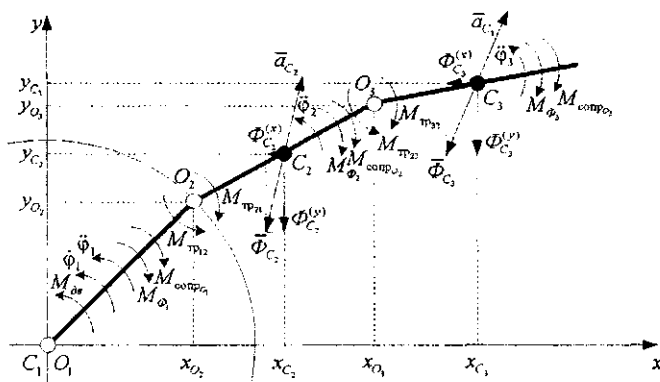
На основе метода кинестатики, позволившего учесть все силовые факторы, воздействующие на трехзвенную систему, составлена расчетная схема динамики движения (рисунок 2) и получены уравнения движения (1)...(3) ударных элементов измельчителя относительно ее кинематических пар ( $O_1$ ,  $O_2$  и  $O_3$ ). Уравнения позволяют в зависимости от поставленной задачи, начальных и граничных условий исследовать процесс ударного разрушения измельчаемого материала и определять текущее положение, углы, скорости и ускорения любой составляющей части звена ударного элемента в любой момент времени.

$$M_{\text{де}} = M_{\text{сопр}_{O_1}} + M_{\text{сопр}_{O_2}} + M_{\text{сопр}_{O_3}} + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 A_{ji} \ddot{\varphi}_i \cos(\varphi_i - \varphi_j) - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 A_{ji} \dot{\varphi}_i^2 \sin(\varphi_i - \varphi_j); \quad (1)$$

$$M_{\text{сопр}_{O_2}} = -M_{\text{тр}_{21}} - M_{\text{сопр}_{O_2}} - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=2}^3 A_{ji} \ddot{\varphi}_i \cos(\varphi_i - \varphi_j) + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=2}^3 A_{ji} \dot{\varphi}_i^2 \sin(\varphi_i - \varphi_j); \quad (2)$$

$$M_{\text{сопр}_{O_3}} = -M_{\text{тр}_{32}} - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=3}^3 A_{ji} \ddot{\varphi}_i \cos(\varphi_i - \varphi_j) + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=3}^3 A_{ji} \dot{\varphi}_i^2 \sin(\varphi_i - \varphi_j). \quad (3)$$





**Рисунок 2 – Расчетная схема трехзвенной механической системы**

На расчетной схеме рисунка 2 показано: оси вращения ( $O_1$ ,  $O_2$  и  $O_3$ ) и центры масс ( $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$ ) соответственно первого, второго и третьего звена;  $x_{O_2}$ ,  $x_{C_2}$ ,  $x_{O_3}$ ,  $x_{C_3}$ ,  $y_{O_2}$ ,  $y_{C_2}$ ,  $y_{O_3}$  и  $y_{C_3}$  – координаты точек  $O_2$ ,  $C_2$ ,  $O_3$  и  $C_3$  соответственно по оси  $x$  и  $y$ ;  $\dot{\varphi}_1$  – угловая скорость первого звена;  $M_{дв}$  – движущий момент всей механической системы;  $\ddot{\varphi}_1$ ,  $\ddot{\varphi}_2$  и  $\ddot{\varphi}_3$  – угловые ускорения соответствующих звеньев;  $M_{\varphi_1}$ ,  $M_{\varphi_2}$  и  $M_{\varphi_3}$  – моменты пар сил инерции звеньев;  $M_{тр_{12}}$ ,  $M_{тр_{23}}$ ,  $M_{тр_{32}}$  и  $M_{тр_{32}}$  – моменты трения в кинематических парах (шарнирах), возникающие между первым и вторым (точка  $O_2$ ) и вторым и третьим (точка  $O_3$ ) звеньями;  $\ddot{a}_{C_2}$  и  $\ddot{a}_{C_3}$  – линейные ускорения центра масс звеньев;  $\bar{\Phi}_{C_2}$  и  $\bar{\Phi}_{C_3}$  – силы инерции центра масс звеньев;  $\Phi_{C_2}^{(x)}$ ,  $\Phi_{C_2}^{(y)}$ ,  $\Phi_{C_3}^{(x)}$  и  $\Phi_{C_3}^{(y)}$  – проекции сил инерции центра масс второго и третьего звена ( $\bar{\Phi}_{C_2}$  и  $\bar{\Phi}_{C_3}$ ) соответственно на ось  $x$  и  $y$ ;  $M_{сопр_{O_1}}$ ,  $M_{сопр_{O_2}}$  и  $M_{сопр_{O_3}}$  – моменты сил сопротивления движению соответственно для первого, второго и третьего звена. Моменты сил сопротивления движению складываются из сопротивления среды, которая включает в себя перепад давления, возникающий при обтекании объекта, и трения, которое возникает между ударными элементами и данной средой.

В уравнениях (1)...(3)  $A_{ij}$  – константы, независимые от движения ударных элементов.

В третьей главе с учетом предъявляемых требований к точности и в соответствии с целью исследований определены основные параметры варьирования, оценены воспроизводимость каждого эксперимента и необходимое число повторов. В соответствии с поставленными задачами разработана программа и методика проведения экспериментальных исследований, обеспечивающих наибольшую точность результатов эксперимента и сведения к минимуму случайных воздействий.

Представлено описание установки, которая позволила осуществить проведение экспериментальных исследований по определению производительности и потребляемой мощности измельчителя, его удерживающей способности, среднего времени пребывания измельчаемого продукта в объеме рабочей камеры, среднего размера частиц готовой фракции, а также основных параметров, характеризующих гидродинамику двухфазных течений (расходы эжектируемого воздуха, скорости и давления в различных точках рабочей камеры) с необходимой на практике точностью.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальным исследованиям.

При изучении структурно-механических свойств объекта исследований определены для разных сортов высушенных хлебобулочных изделий в зависимости от их конечной влажности  $w$  такие важнейшие механические характеристики, как коэффициент Пуассона (0,12...0,32), предел прочности при растяжении (0,075...0,75 МПа) и сжатии (0,2...3,5 МПа), величина модуля упругости (4,3...40 МПа) в условиях статического одноосного сжатия и величина модуля сдвига (1,6...18 МПа). Математическая обработка результатов позволила выразить предельные напряжения  $\sigma_{np}$  и предельные деформации  $\varepsilon_{np}$ , при которых происходит полное разрушение образцов при статическом нагружении, следующими аналитическими зависимостями:

- для образцов из пшеничной муки

$$\sigma_{np} = -0,015 \cdot w + 0,4, \quad (4)$$

$$\varepsilon_{np} = 0,003 \cdot w + 0,01; \quad (5)$$

- для образцов из ржаной муки

$$\sigma_{np} = -0,247 \cdot w + 3,9, \quad (6)$$

$$\varepsilon_{np} = 0,005 \cdot w + 0,01. \quad (7)$$

Указанные механические характеристики получены при статическом нагружении, но позволяют определить динамическую нагрузку во время удара, которая является основой расчета геометрических параметров узлов проектируемой дробилки.

Получены новые уравнения, описывающие зависимость текущего значения линейной деформации от величины нормального напряжения в высушенных хлебобулочных изделиях:

$$\bar{\varepsilon} = \exp(-A \cdot \sigma^N), \quad (8)$$

где  $\bar{\varepsilon}$  – приведенная относительная деформация;

$\sigma$  – напряжение сжатия;

$A$  и  $N$  – эмпирические константы (параметры идентификации уравнения к опытными данным).

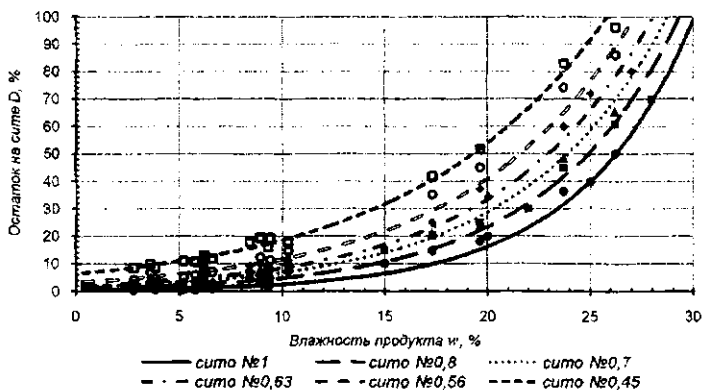
Определены такие важнейшие гидродинамические параметры работы измельчителя "ИХ-500", как объемный расход воздуха на входе (273,5 м<sup>3</sup>/ч) и на выходах (118,2 и 155,3 м<sup>3</sup>/ч) из помольной камеры. Распределение полей давлений (полного, скоростного и статического) и скоростей газового потока воздуха по различным сечениям камеры измельчения показало, что разрежение по оси камеры может достигать 150 Па, а избыточное давление на стенке до 400 Па. Знание данных параметров позволяет определить значения относительных скоростей движения газовой и дисперсной фазы частиц измельчаемого материала в объеме аппарата (от 20 до 40 м/с).

Показано, что в разработанной конструкции измельчителя реализован насосный эффект, позволяющий не только исключить выброс продуктов измельчения из камеры загрузки и свести пыление продуктом к минимуму, но и, в случае подключения измельчителя к циклону, более эффективно выделять мелкую фракцию.

Установлена зависимость (рисунок 3) между влажностью  $w$  исходного продукта и достигаемой степенью измельчения на выходе из помольной камеры. Статистическая обработка данных позволила получить следующую зависимость остатка на сите № 1:

$$D = 0,43 \cdot \exp(0,18 \cdot w). \quad (9)$$

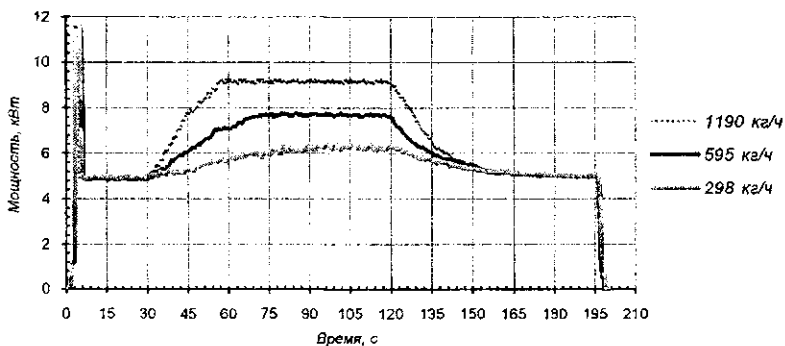
С учетом этого определена оптимальная влажность высушенных хлебобулочных изделий (3...7%) для получения панировочных сухарей, при которой готовый продукт соответствует требованиям ГОСТ 28402-89.



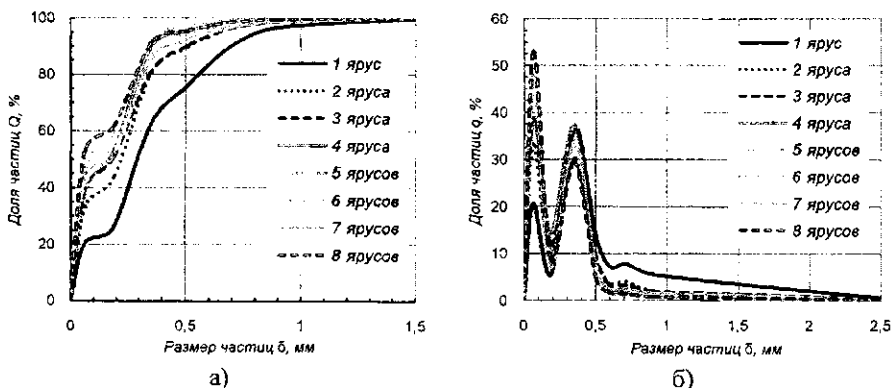
**Рисунок 3 – Зависимость дисперсного состава панировочных сухарей от влажности исходного продукта**

Установлена оптимальная для данного типа измельчителя производительность (500...600 кг/ч), позволяющая достигать наилучшего качества готового продукта (с учетом влажности исходного продукта до 10%),

при минимальных энергозатратах. Оценку качества измельчения проводили методом ситового анализа, а также с использованием прибора LS 100 Q фирмы Beckman Coulter. Оптимизация работы измельчителя проводилась в диапазоне производительности от 300 до 1200 кг/ч. Анализ результатов исследований показал (рисунок 4), что при производительности 1190 кг/ч наблюдается превышение номинальной потребляемой мощности электродвигателя, что приводит к его перегрузкам. При производительности 298 кг/ч величина потребляемой мощности составляет 6 кВт, т.е. 75% от номинала. В номинальном режиме двукратное повышение производительности до 600 кг/ч достигается за счет 25% повышения потребляемой мощности (8 кВт).



**Рисунок 4 – Экспериментальные кривые потребляемой мощности, полученные при различной производительности измельчителя**



а) интегральные; б) дифференциальные

**Рисунок 5 – Кривые распределения частиц по размерам измельченных черствых хлебобулочных изделий с влажностью  $5 \pm 1,5\%$**

При описании гранулометрического состава порошка построены интегральные (рисунок 5, а) и дифференциальные (рисунок 5, б) функции распределения частиц по размерам.

Определены важнейшие характеристики интегральных кривых распределения частиц по размерам (рисунок 5, а):

- $\delta_{10}$  – размер частицы, для которой остаток на сите составляет 10%, мкм;
- $\delta_{90}$  – размер частицы, для которой остаток на сите составляет 90%, мкм;
- $\delta_m (\delta_{50})$  – медианный диаметр, т.е. размер частицы, для которой остаток на сите составляет 50%, мкм.

$$\delta_{10} = -7,46 \cdot \ln(n) + 24,39; \quad (10)$$

$$\delta_{50} = -112,27 \cdot \ln(n) + 307,57; \quad (11)$$

$$\delta_{90} = -173,32 \cdot \ln(n) + 675,99. \quad (12)$$

Зависимости (10)...(12) характерных размеров частиц от количества ярусов  $n$  ударных элементов показывают, что размер частиц  $\delta_{50}$  и  $\delta_{90}$  уменьшается с увеличением количества ярусов ударных элементов, в то время как размер частиц, для которых остаток на сите составляет 10%, практически остается неизменным.

Анализ дифференциальных кривых распределения частиц по размерам (рисунок 5, б) позволил установить, что с увеличением количества ярусов ударных элементов  $n$  средний эквивалентный размер фракции  $\delta_k$  измельченного материала уменьшается (13), а среднее квадратическое отклонение  $\sigma_0$  увеличивается (14), причем максимальный размер частиц после измельчения, при различном количестве ярусов ударных элементов, в среднем лежит в пределах 1...2 мм, при этом установка двух ярусов бил обеспечивает выход до 85% частиц менее 500 мкм.

$$\delta_k = 403,1 \cdot n^{-0,31}; \quad (13)$$

$$\sigma_0 = 0,52 \cdot n^{0,09}. \quad (14)$$

Установлено, что степень измельчения  $i$ , являясь одной из основных характеристик процесса измельчения, напрямую зависит от количества ярусов ударных элементов  $n$  и может быть представлена зависимостью (15), анализ которой показывает, что с увеличением количества ярусов и соответственно числа ударных элементов также увеличивается и степень измельчения:

$$i = 317,9 \cdot n^{0,31}. \quad (15)$$

Экспериментально подтверждено предположение, что основное разрушение материала происходит в верхних рядах ударных элементов, а в последующих – его доизмельчение до размера требуемой фракции.

Доказано, что с увеличением числа ударных элементов растет сопротивление среды и, следовательно, увеличиваются затраты мощности, растет энергопотребление при постоянной производительности процесса измельчения.

На рисунке 6 показаны зависимости потребляемой мощности в рабочем режиме  $N_p$ , мощности холостого хода  $N_x$  и мощности  $N_u$ , затраченной непосредственно на сам процесс измельчения, от количества ярусов ударных элементов  $n$ .

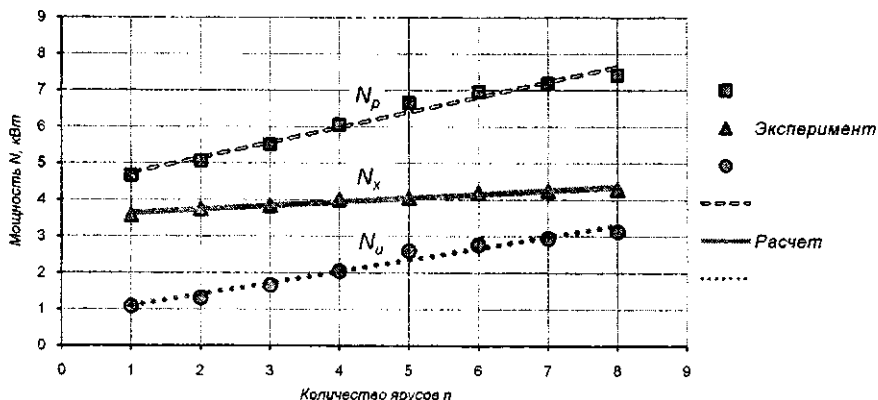


Рисунок 6 – Зависимость затрат мощности от количества ярусов ударных элементов

Экспериментальные данные по затратам мощности позволили определить коэффициент полезного действия измельчителя. На основании проведенного анализа была получена математическая зависимость (16), которая показывает, что коэффициент полезного действия  $\eta$  измельчителя с увеличением количества ярусов ударных элементов  $n$  растет и при числе ярусов равным восьми достигает порядка 45%:

$$\eta = N_u / N_p = 0,222 \cdot n^{0,31} \quad (16)$$

Установлено (рисунок 7), что удерживающая способность измельчителя растет с увеличением производительности, а среднее время пребывания падает.

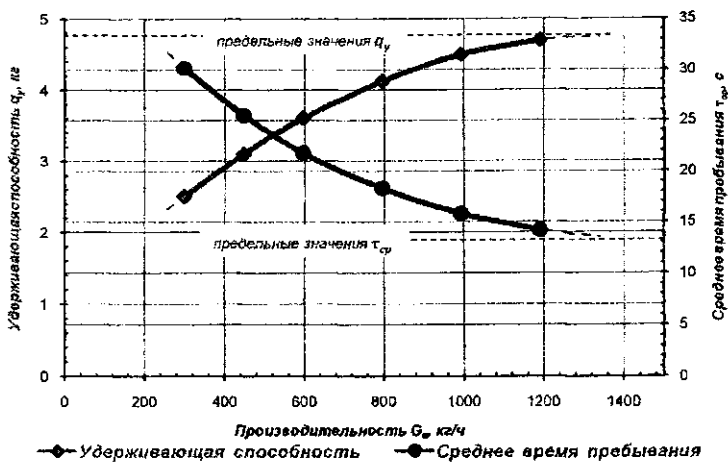
Математическая обработка результатов, представленных на рисунке 7, позволила получить следующие зависимости:

– по удерживающей способности

$$q_y = 0,181 \cdot G_0^{0,46}; \quad (17)$$

– по среднему времени пребывания

$$\tau_{cp} = 735,5 \cdot G_0^{-0,55} \quad (18)$$



**Рисунок 7 – Зависимость удерживающей способности и среднего времени пребывания от производительности измельчителя**

Выявлено, что с увеличением среднего времени пребывания происходит равномерное изменение влажности измельчаемого материала по всему объему. Это обстоятельство позволяет в процессе измельчения, в зависимости от влажности окружающей среды, досушивать или увлажнять готовый продукт.

Результаты проведенных экспериментальных исследований дали возможность оптимизировать режимы работы и геометрию измельчающего оборудования для панировочных сухарей в зависимости от производительности, потребляемой мощности, среднего времени пребывания измельчаемого продукта в помольной камере, влажности, сорта и размеров начального куска исходного продукта, а также среднего размера частиц готовой фракции. Полученные результаты позволили определить диапазоны изменения кинематических, геометрических и технологических параметров измельчителя, обеспечивающие его выход на рациональный режим работы и наметить механизмы точной его настройки.

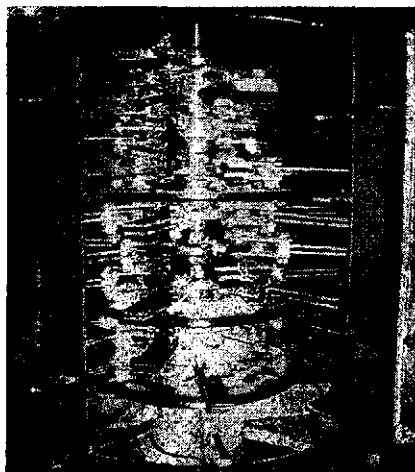
**В пятой главе** экспериментально доказана пригодность и экономическая эффективность разработанной конструкции измельчителя для переработки высушенных хлебулочных изделий из ржаной и пшеничной муки высшего сорта при производстве панировочных сухарей.

Представлены результаты промышленных испытаний и обобщен опыт промышленной эксплуатации новой конструкции измельчителя хлеба "ИХ-500" (рисунок 8) роторного типа с шарнирно закрепленными ударными элементами, который внедрен на производствах № 4 и № 3 РУПП "Могилевхлебпром". Готовый продукт, полученный путем измельчения высушенных хлебулочных изделий, соответствует требованиям ГОСТ 28402-89 "Сухари панировочные".

Достигнутая в производственных условиях производительность (в зависимости от типа и начальной влажности измельчаемого продукта) составила 400...600 кг/ч, что в 1,25 раза выше, чем у кормодробилки КДУ-2, при этом затраты мощности снижены с 30 до 7,5 кВт. После измельчителя "ИХ-500" исключена стадия сортировки готового продукта, так как весь продукт соответствует ГОСТу сразу после измельчения.



а)



б)

а) общий вид установки на производстве № 4; б) расположение бил в объеме измельчителя

**Рисунок 8 – Измельчитель хлеба "ИХ-500"**

На измельчитель разработаны техническая документация и паспорт.

Предложена методика инженерного расчета устройств ударного действия, позволяющая на стадии проектирования определять основные конструктивные и энергетические параметры измельчителя на различную производительность.

Определены области рационального использования измельчителя применительно к совмещенным с измельчением технологическим процессам (сушка, пневмокласификация, смешивание и т.п.).

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

I Впервые изучены закономерности статического деформирования образцов разных сортов высушенных хлебобулочных изделий в зависимости от их конечной влажности. Определены такие важнейшие механические характеристики, как коэффициент Пуассона (0,12...0,32), предел прочности при



растяжении (0,075...0,75 МПа) и сжатии (0,2...3,5 МПа), величина модуля упругости (4,3...40 МПа) и модуля сдвига (1,6...18 МПа). Величина предельных деформаций для всех исследуемых образцов в среднем составила 0,01...0,05. Получены аппроксимационные зависимости пределов прочности и деформации при сжатии от влажности, вида и сорта высушенных хлебобулочных изделий, а также уравнения, математически описывающие зависимость текущего значения линейной деформации от величины нормального напряжения в высушенных хлебобулочных изделиях [1–А...3–А, 11–А, 12–А, 17–А...20–А].

2 На основе метода кинестатики получены уравнения движения ударных элементов модели механической системы. Предложенный метод позволил учесть все силовые факторы, воздействующие на трехзвенную систему. Уравнения позволяют в зависимости от поставленной задачи, начальных и граничных условий исследовать процесс ударного разрушения измельчаемого материала и определять текущее положение, углы, скорости и ускорения любой составляющей части звена ударного элемента в любой момент времени. Получены зависимости, позволившие установить скорость и траекторию движения батона при входе в камеру измельчения, определить точку встречи с биллом и оптимальную зону удара [23–А, 24–А].

3 Теоретические и экспериментальные исследования позволили определить диапазоны изменения рациональных геометрических, кинематических, технологических и энергетических параметров измельчителя при переработке высушенных хлебобулочных изделий, обеспечивающие повышение производительности и уменьшение энергоемкости процесса измельчения. Установлено, что наиболее оптимальным для измельчения является радиальный размер ударных элементов 245...290 мм. Для попадания в зону удара угол наклона схода батона в камеру измельчения должен быть в пределах  $60 \pm 5^\circ$  при высоте падения 100...150 мм, для рабочей камеры диаметром 500...600 мм. При производительности 500...600 кг/ч и влажности высушенных хлебобулочных изделий 3...7% достигается соответствие готового продукта требованиям ГОСТ 28402-89 при минимальных энергозатратах [4–А, 8–А, 9–А, 13–А, 16–А].

4 Экспериментальные исследования позволили:

- определить объемный расход воздуха на входе и на выходе из измельчителя, полный, скоростной и статический напоры, а также скорость потока воздуха в различных точках камеры измельчения (по радиусу и высоте камеры);
- определить среднее время пребывания материала в объеме рабочей камеры и удерживающую способность по твердой фазе; установлено, что с увеличением производительности удерживающая способность растет, а среднее время пребывания падает;
- установить, что степень измельчения напрямую зависит от числа ударных элементов и что основное разрушение материала происходит в верхних рядах ударных элементов, а в последующих – его доизмельчение до

размера требуемой фракции (при измельчении целого высушенного батона стандартного размера степень измельчения только в первом ряду ударных элементов составляет более 300 единиц);

- установить, что с увеличением количества ярусов ударных элементов средний эквивалентный размер фракции измельченного материала уменьшается, а среднее квадратическое отклонение увеличивается, причем максимальный размер частиц после измельчения при различном количестве ярусов ударных элементов в среднем лежит в пределах 1...2 мм, при этом установка двух ярусов бил обеспечивает выход до 85% частиц менее 500 мкм;

- показать, что с увеличением количества ярусов ударных элементов увеличиваются затраты мощности, растет энергопотребление при постоянной производительности процесса измельчения, но с учетом соотношения мощности, затраченной непосредственно на сам процесс измельчения, к потребляемой в рабочем режиме коэффициент полезного действия измельчителя также увеличивается и составляет порядка 45% [5-А, 9-А, 10-А, 14-А...16-А, 21-А, 22-А, 25-А].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1 По результатам проведенных исследований установлены основные направления развития техники помолы, сформированы критерии создания помольного оборудования, предложена методика инженерного расчета устройств ударного действия и разработан новый измельчитель "ИХ-500" для переработки высушенных хлебобулочных изделий [4-А, 6-А, 7-А, 13-А, 26-А], (приложения А...В).

2 Измельчитель "ИХ-500" в количестве двух единиц внедрен на производствах № 3 и № 4 РУПП "Могилевхлебпром", выпускающих готовую продукцию, соответствующую ГОСТ 28402-89 "Сухари панировочные". На производстве № 3 того же предприятия на базе измельчителя "ИХ-500" запущена новая линия по производству панировочных сухарей (приложения Г...Е).

3 В процессе эксплуатации в производственных условиях доказана технологическая пригодность и экономическая эффективность измельчителя "ИХ-500" [8-А]. Годовой экономический эффект от внедрения на производстве № 4 РУПП "Могилевхлебпром" взамен устаревшей кормодробилки КДУ-2 составил 92,8 млн руб. в ценах по состоянию на 1 января 2007 г. Срок окупаемости новой техники составляет 0,09 года (приложение Ж).

4 Разработанный измельчитель может быть использован для измельчения различного хрупкого и вязкопластичного сырья в пищевой, химической, химико-фармацевтической и других отраслях промышленности. Проведенные исследования позволили дополнительно определить область рационального использования применительно к совмещенным с измельчением технологическим процессам (сушка, пневмокласификация, смешивание и т.п.).

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в научных журналах

1–А. Курилович, Н.Н. Исследования физико-механических свойств высушенных хлебобулочных изделий, используемых в производстве панировочных сухарей / Н.Н. Курилович, В.Г. Харкевич, В.А. Шуляк // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2006. – № 5. – С. 20-21.

2–А. Харкевич, В.Г. Обобщение результатов исследований по статическому разрушению хрупких пищевых материалов / В.Г. Харкевич, В.А. Шуляк // Вестник МГУП. – 2007. – № 1. – С. 93-99.

3–А. Курилович, Н.Н. Определение физико-механических свойств высушенных хлебобулочных изделий как объекта измельчения / Н.Н. Курилович, В.Г. Харкевич, В.А. Шуляк // Материалы, технологии, инструменты. – 2007. – Т. 12. – № 4. – С. 108-113.

4–А. Харкевич, В.Г. Разработка и исследование оборудования для измельчения высушенных хлебобулочных изделий в производстве панировочных сухарей / В.Г. Харкевич, В.А. Шуляк // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2008. – № 2. – С. 101-106.

5–А. Харкевич, В.Г. Зависимость качества панировочных сухарей от сорта и влажности исходного сырья / В.Г. Харкевич // Молодежь в науке – 2007: прил. к журн. "Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі". В 4 ч. М 75 Ч. 4. Серия аграрных наук / редкол.: В. Г. Гусаков (гл. ред.), И.М. Богдевич [и др.]. – Минск: Белорус. наука, 2008. – С. 384-388.

### Статьи в сборниках трудов конференций, тезисы докладов

6–А. Харкевич, В.Г. Разработка и исследование новой ресурсосберегающей конструкции дробилки / В.Г. Харкевич // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы республиканской научно-технической конференции. – Могилев: ГУ ВПО "Белорусско-Российский университет", 2005. – С. 75.

7–А. Харкевич, В.Г. Разработка и исследование новых технологий вторичной переработки хлеба / В.Г. Харкевич // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы республиканской научно-технической конференции. – Могилев: ГУ ВПО "Белорусско-Российский университет", 2005. – С. 76.

8–А. Харкевич, В.Г. Достигнутые в производстве технические характеристики нового измельчителя хлеба "ИХ-500" / В.Г. Харкевич, В.А. Шуляк // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 21-22 апр. 2005 г. В 2 ч. Ч. 1 / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – С. 125-126.

9—А. Харкевич, В.Г. Результаты испытаний измельчителя "ИХ-500" для производства панировочных сухарей / В.Г. Харкевич // Техника и технология пищевых производств: тезисы докладов V-й Международной научно-технической конференции, 18-20 мая 2005 г., Могилев / УО "Могилевский государственный университет продовольствия"; редколлегия: Т.С. Хасаншин (отв. ред.) [и др.]. — Минск: Издательский центр БГУ, 2005. — С. 220.

10—А. Харкевич, В.Г. Влияние влажности исходного сырья на дисперсный состав продуктов помола / В.Г. Харкевич // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы респ. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Бел.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. — Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2006. — С. 325.

11—А. Харкевич, В.Г. Приборы и методика проведения исследований свойств высушенного хлеба как объекта измельчения / В.Г. Харкевич, Н.Н. Курилович, В.А. Шуляк // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф.: В 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Могилев, обл. исполн. ком., Нац. акад. наук Респ. Беларусь, Бел.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. — Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2006. — Ч. 1. — С. 171-172.

12—А. Харкевич, В.Г. Результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств измельчаемого продукта / В.Г. Харкевич, Н.Н. Курилович, В.А. Шуляк // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф.: В 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Могилев, обл. исполн. ком., Нац. акад. наук Респ. Беларусь, Бел.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. — Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2006. — Ч. 1. — С. 173-174.

13—А. Харкевич, В.Г. Разработка и исследование оборудования для вторичной переработки хлеба / В.Г. Харкевич, А.Г. Смусенок // Техника и технология пищевых производств: тез. докл. V Междунар. науч. конф. студентов и аспирантов 26-27 апреля 2006 г., Могилев / УО "Могилевский государственный университет продовольствия"; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред.) [и др.]. — Мог.: УО "МГУП", 2006. — С. 5-10.

14—А. Харкевич, В.Г. Результаты экспериментальных исследований процесса получения панировочных сухарей / В.Г. Харкевич, В.А. Шуляк // Техника и технология пищевых производств: тез. докл. V Междунар. науч. конф. студентов и аспирантов 26-27 апреля 2006 г., Могилев / УО "Могилевский государственный университет продовольствия"; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред.) [и др.]. — Мог.: УО "МГУП", 2006. — С. 240.

15–А. Харкевич, В.Г. Экспериментальные исследования гидродинамических режимов работы нового измельчителя хлеба "ИХ-500" / В.Г. Харкевич, В.А. Шуляк // Проблемы интенсификации интеграции науки и производства: сборник трудов Международной научно-практической конференции, 24-25 ноября 2006 г. / Бух. технолог. ин-т пищ. и легк. пром.; редкол.: М.Т. Хаджиев [и др.]. – Бухара: БухТИПиЛП, 2006. – С. 261-264.

16–А. Харкевич, В.Г. Зависимость фракционного состава панировочных сухарей от производительности измельчителя / В.Г. Харкевич, В.А. Шуляк // VIII Всероссийская конференция молодых ученых с международным участием "Пищевые технологии" (г. Казань, 9-10 апреля 2007 г.). Сборник тезисов докладов – Казань: Издательство "Отечество", 2007. – С. 98.

17–А. Харкевич, В.Г. Влияние влажности на физико-механические свойства высушенных хлебобулочных изделий / В.Г. Харкевич, В.А. Шуляк // VIII Всероссийская конференция молодых ученых с международным участием "Пищевые технологии" (г. Казань, 9-10 апреля 2007 г.). Сборник тезисов докладов – Казань: Издательство "Отечество", 2007. – С. 336.

18–А. Харкевич, В.Г. Экспериментальные исследования напряженного состояния хрупких материалов / В.Г. Харкевич, В.А. Шуляк // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф.: В 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Федеральное агентство по образованию, Могилев, обл. исполн. ком., Нац. акад. наук Респ. Беларусь, Бел.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2007. – Ч. 1. – С. 155.

19–А. Харкевич, В.Г. Определение динамического коэффициента при ударном разрушении хрупких материалов / В.Г. Харкевич, Н.Н. Курилович, В.А. Шуляк // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф.: В 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Федеральное агентство по образованию, Могилев, обл. исполн. ком., Нац. акад. наук Респ. Беларусь, Бел.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2007. – Ч. 1. – С. 156-157.

20–А. Харкевич, В.Г. Экспериментальные исследования процесса статического разрушения высушенных хлебобулочных изделий / В.Г. Харкевич, В.А. Шуляк // Техника и технология пищевых производств: тез. докл. VI Междунар. науч.-техн. конф., 22-23 мая 2007 г., Могилев / УО "Могилевский государственный университет продовольствия"; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред.) [и др.]. – Могилев: УО МГУП, 2007. – С. 234-235.

21–А. Харкевич, В.Г. Исследование процесса измельчения черствых хлебобулочных изделий при различной производительности / В.Г. Харкевич, В.А. Шуляк // Техника и технология пищевых производств: тез. докл. VI Междунар. науч.-техн. конф., 22-23 мая 2007 г., Могилев / УО "Могилевский государственный университет продовольствия"; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред.) [и др.]. – Могилев: УО МГУП, 2007. – С. 240.

22–А. Харкевич, В.Г. Исследование среднего времени пребывания материала в роторной дробилке / В.Г. Харкевич, В.А. Шуляк // Техника и технология пищевых производств: тез. докл. VI Междунар. науч.-техн. конф., 22-23 мая 2007 г., Могилев / УО "Могилевский государственный университет продовольствия"; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред.) [и др.]. – Могилев: УО МГУП, 2007. – С. 241.

23–А. Харкевич, В.Г. Исследование траектории движения измельчаемого материала до момента столкновения с ударными элементами / В.Г. Харкевич, В.А. Шуляк // Техника и технология пищевых производств: тез. докл. VI Междунар. науч. конф. студ. и аспирантов, Могилев, 24-25 апр., 2008 г.: в 2 ч. / Мог. гос. ун-т прод.; редкол.: А.В. Акулич [и др.]. – Могилев, 2008. – Ч. 1. – С. 9-10.

24–А. Харкевич, В.Г. Исследование закона движения материала по загрузочному лотку измельчающей машины / В.Г. Харкевич, В.А. Шуляк // Техника и технология пищевых производств: тез. докл. VI Междунар. науч. конф. студ. и аспирантов, Могилев, 24-25 апр., 2008 г.: в 2 ч. / Мог. гос. ун-т прод.; редкол.: А.В. Акулич [и др.]. – Могилев, 2008. – Ч. 2. – С. 96-97.

25–А. Харкевич, В.Г. Определение объемного расхода воздуха в измельчителе "ИХ-500" / В.Г. Харкевич // Техника и технология пищевых производств: тез. докл. VII Междунар. науч.-техн. конф., 21-22 мая 2009 г., Могилев.: в 2 ч. / Учреждение образования «Могилевский государственный университет продовольствия»; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред.) [и др.]. – Могилев: УО МГУП, 2009. – Ч. 2. – С. 64.

### Патент

26–А. Измельчитель: пат. 12226 Респ. Беларусь, МПК (2006) В 02С 13/14 / В.Г. Харкевич, В.А. Шуляк; заявитель УО "Мог. гос. ун-т. прод." – № а 20070481; заявл. 27.04.07; опубл. 30.08.09 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 4. – С. 79.

## РЭЗЮМЕ

Харкевіч Віталь Генадзьевіч

Драбненне высушаных хлебабулачных вырабаў у прыладах ударнага дзеяння з шматзвеннымі працоўнымі органамі

Ключавыя словы: гідрадынаміка двухфазных патокаў, грануламетрычны састаў, драбненне, здрабняльнік, ступень драбнення, сухары паніровачныя, сярэдні час прабывання, ударныя элементы, ураўненні руху, утрымальная здольнасць, фізіка-механічныя ўласцівасці, харчовыя парашкі.

Работа прысвечана вынікам навуковых даследаванняў працэсу драбнення высушаных хлебабулачных вырабаў у вытворчасці паніровачных сухароў.

У рабоце прыводзіцца метадыка апрацоўкі і абагульненыя вынікі эксперыментальных даследаванняў фізіка-механічных уласцівасцей высушаных да рознай вільготнасці разнастайных сартоў хлебабулачных вырабаў, якія выкарыстоўваюцца ў вытворчасці паніровачных сухароў. Атрыманы новыя ўраўненні, якія апісваюць працэс статычнага разбурэння высушаных хлебабулачных вырабаў. Праведзена параўнанне эксперыментальных і разліковых значэнняў. Устаноўлена ўзаемная залежнасць трываласных і фізіка-хімічных уласцівасцей матэрыялу. Вызначаны такія важнейшыя механічныя характарыстыкі, як каэфіцыент Пуасона  $\mu$ , модуль пругкасці  $E$  і модуль зруху  $G$ .

Даследавана дынаміка рухаў здрабняльнага матэрыялу і ударных элементаў. На аснове метаду кінестатыкі атрыманы ўраўненні, якія дазваляюць у залежнасці ад пастаўленай задачы, пачатковых і гранічных умоў даследаваць працэс ударнага разбурэння.

Даследаваны важнейшыя параметры, якія характарызуюць гідрадынамічнае становішча ў аб'ёме здрабняльніка. Устаноўлены ўзаемаўплыў асноўных тэхналагічных параметраў, расходных характарыстык і рэжымаў работы на якасны састаў гатовага прадукту (сухароў паніровачных). Вызначаны дыяпазоны змянення рацыянальных геаметрычных, кінематычных, тэхналагічных і энергетычных параметраў здрабняльніка, якія забяспечваюць павышэнне прадукцыйнасці і памяншэнне энергаёмнасці працэсу драбнення.

Распрацаваны і ўкаранены на прадпрыемствах Магілёўскай вобласці новы здрабняльнік "ИХ-500", які выкарыстоўваецца для атрымання якасных харчовых парашкоў.

## РЕЗЮМЕ

Харкевич Виталий Геннадьевич

Измельчение высушенных хлебобулочных изделий в устройствах ударного действия с многозвенными рабочими органами

Ключевые слова: гидродинамика двухфазных потоков, гранулометрический состав, измельчение, измельчитель, пищевые порошки, среднее время пребывания, степень измельчения, сухари панировочные, ударные элементы, удерживающая способность, уравнения движения, физико-механические свойства.

Работа посвящена результатам научных исследований процесса измельчения высушенных хлебобулочных изделий в производстве панировочных сухарей.

В работе представлена методика обработки и обобщенные результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств высушенных до разной влажности различных сортов хлебобулочных изделий, используемых в производстве панировочных сухарей. Получены новые уравнения, описывающие процесс статического разрушения высушенных хлебобулочных изделий. Проведено сравнение экспериментальных и расчетных значений. Установлена взаимная зависимость прочностных и физико-химических свойств материала. Определены такие важнейшие механические характеристики, как коэффициент Пуассона  $\mu$ , модуль упругости  $E$  и модуль сдвига  $G$ .

Исследована динамика движений измельчаемого материала и ударных элементов. На основе метода кинестатики получены уравнения, позволяющие в зависимости от поставленной задачи, начальных и граничных условий исследовать процесс ударного разрушения.

Исследованы важнейшие параметры, характеризующие гидродинамическую обстановку в объеме измельчителя. Установлено взаимовлияние основных технологических параметров, расходных характеристик и режимов работы на качественный состав продукта (сухарей панировочных). Определены диапазоны изменения рациональных геометрических, кинематических, технологических и энергетических параметров измельчителя, обеспечивающие повышение производительности и уменьшение энергоемкости процесса измельчения.

Разработан и внедрен на предприятиях Могилевской области новый измельчитель "ИХ-500", используемый для получения качественных пищевых порошков.



## SUMMARY

Kharkevich Vitali Gennadievich

Crushing of dried up bakery products in devices of impact action  
with multiple-link working elements

Key words: average residence time, crusher, crushing, degree of crushing, dried breadcrumbs, equation of motion, food powders, granulometric composition, hydrodynamics of two-phase flows, operating holdup, percussive elements, physical-mechanical properties.

The work deals with the results of scientific investigations of crushing of dried up bakery products in the production of dried breadcrumbs.

Processing technique and generalized results of physical-mechanical properties of various kinds of bakery products dried up to different moisture and used in the production of dried breadcrumbs are given in the work. New equations describing static destruction process of dried bakery products have been obtained. Experimental and theoretical values have been compared. Interrelation of strength and physical-mechanical properties of the material has been determined.

The most important mechanical characteristics such as Poisson's ratio  $\mu$ , coefficient of elasticity  $E$  and shear modulus  $G$  have been defined.

Dynamics of the movement of crushed material and percussive elements has been studied. On the basis of the method of dynamic force analysis equations allowing to study the process of impact destruction in accordance with the set task, initial and boundary conditions have been obtained.

The most important parameters describing hydrodynamic conditions in the crusher unit have been studied. Interaction of main technological parameters, operating characteristics and conditions on the quality composition of end product (dried breadcrumbs) have been found. Ranges of the change of rational, geometrical, kinematic, technological and power parameters of the crusher allowing to increase efficiency and decrease power consumption of crushing process have been determined.

New crusher "ИХ-500" used for obtaining quality food powders has been developed and put into operation at the enterprises of Mogilev region.

