

УДК 664.66.016

## ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СТАТИЧЕСКОМУ РАЗРУШЕНИЮ ХРУПКИХ ПИЩЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ

*В.Г. Харкевич, В.А. Шуляк*

Представлена методика обработки экспериментальных данных по деформации и разрушению хрупких материалов. Получены новые уравнения, описывающие процесс статического разрушения высушенных хлебобулочных изделий. Выполнено обобщение экспериментальных данных по пределу прочности и величине предельной деформации при статическом сжатии образцов белого и черного хлеба. Проведено сравнение экспериментальных и расчетных значений. Получены новые аппроксимационные зависимости пределов прочности и деформации от влажности, вида и сорта высушенных хлебобулочных изделий. Установлена взаимная зависимость прочностных и физико-химических свойств материала.

### Введение

Изучению физико-механических свойств пищевых продуктов, подвергаемых измельчению, до настоящего времени уделялось недостаточное внимание. Знание этих свойств позволяет оценить динамические напряжения во время удара, которые входят в условия прочности и соответственно определяют основные геометрические и кинематические параметры рабочих органов дробилки. Они также дают возможность оптимизировать режимы работы измельчаемого оборудования с учетом заданных начальных и требуемых конечных параметров продукта (размеров начального куска, частиц готовой фракции, влажности, технологической задачи измельчения и т.д.).

В Могилевском государственном университете продовольствия на кафедре прикладной механики ведется работа по разработке новой усовершенствованной техники для получения порошков из хрупких материалов, в частности панировочных сухарей. Одним из конструктивных решений является новый измельчитель хлеба "ИХ-500". Измельчитель выполнен в виде роторной дробилки по нашему патенту Российской Федерации [1], имеющей вертикальное компоновочное решение с верхней загрузкой и многозвенными шарнирно закрепленными на валу ударными элементами [2, 3]. Принцип работы новой дробилки основан на свободном ударном разрушении. При этом механизм воздействия на частицу базируется на разрушении при свободном ударе с твердой поверхностью (соударение материала с билами и вторичное разрушение при ударе и истирании осколков частиц о стенки корпуса) или частиц друг с другом.

Измельчитель имеет ряд оригинальных конструктивных особенностей, обеспечивающих длительную и надежную работу: удобство загрузки и разгрузки, отсутствие вибраций и минимальный уровень шума. Все элементы, находящиеся в контакте с пищевым продуктом, выполнены из нержавеющей стали и по сравнению с аналогами обладают большей долговечностью.

Полученные нами ранее данные по физико-механическим свойствам высушенных хлебобулочных изделий при статических нагружениях [4, 5] позволяют прогнозировать динамические напряжения во время удара. Предельные значения этих напряжений входят в условия прочности и соответственно определяют величину ударного усилия по длине бил и по высоте дробилки.

До настоящего времени исследования, связанные с математическим описанием прочностных свойств высушенных хлебобулочных изделий, используемых для получения панировочных сухарей, не проводились. Поэтому исследования, направленные на установление взаимной зависимости прочностных свойств материала от их начальной влажности и сорта хлебобулочных изделий, являются актуальной научно-технической задачей и необходимым этапом при проектировании и создании нового оборудования.

### Постановка задачи

Целью данной работы явилась математическая обработка экспериментальных данных и получение уравнений, описывающих процесс статического разрушения высушенных хлебобулочных изделий.

Исследования базировались на полученных ранее результатах по определению физико-механических свойств высушенных хлебобулочных изделий в зависимости от их влажности, вида и сорта [3, 4, 5, 6]. На основании проведенных экспериментальных исследований были получены уравнения для различных видов хлебобулочных изделий из пшеничной и ржаной муки. Уравнения математически описывают зависимость текущего значения линейной деформации от величины нормального напряжения в высушенных хлебобулочных изделиях. Также поставлена задача определения предельных значений разрушающих напряжений и деформаций в зависимости от сорта и влажности изделия.

### Результаты экспериментов и их обработка

В результате проведения экспериментов и математической обработки опытных данных были получены зависимости, описывающие экспериментальные кривые статического разрушения высушенных хлебобулочных изделий (рис. 1).

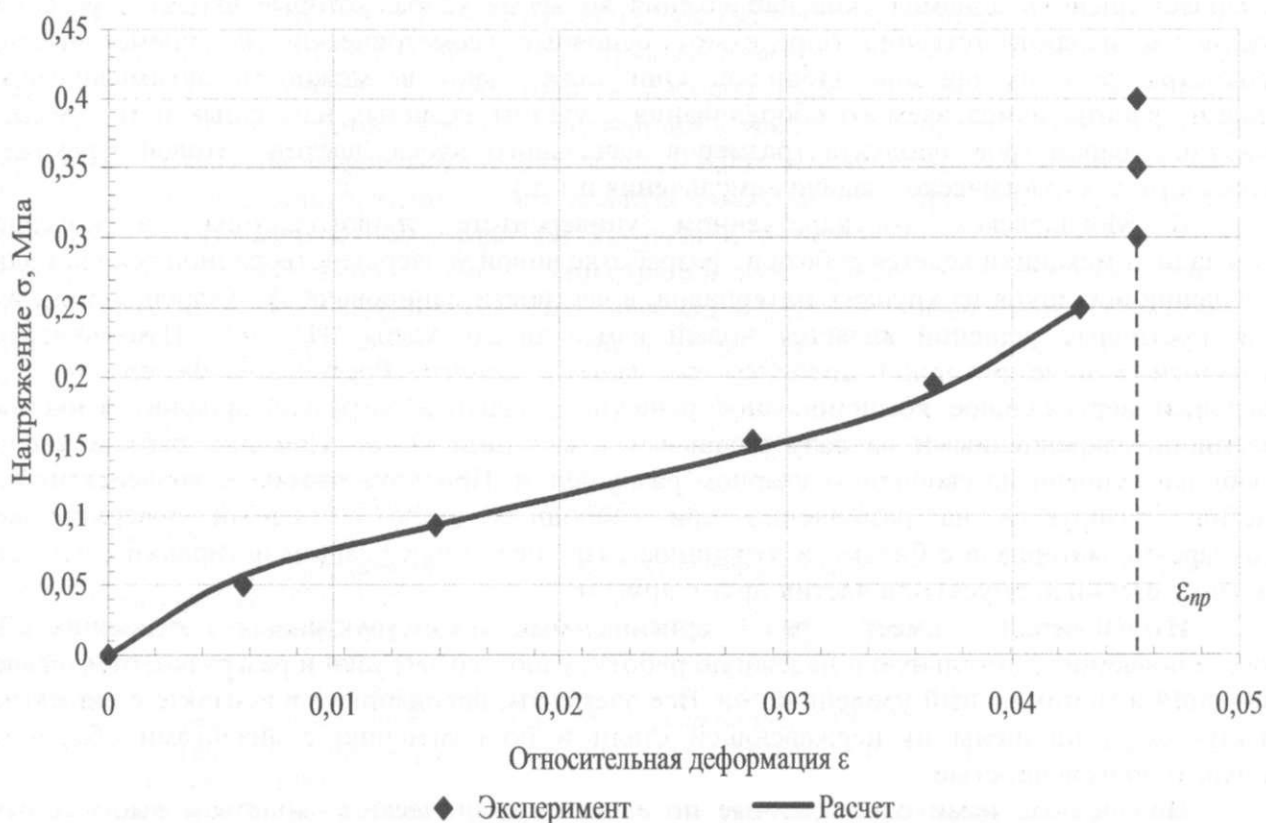


Рисунок 1 – Сопоставление экспериментальных и расчетных данных по деформированию образцов высушенных хлебобулочных изделий из пшеничной муки с влажностью 3,2%

С целью упрощения методики нахождения эмпирических коэффициентов полученные кривые были преобразованы к единичному виду (рис. 2) путем ввода новой переменной – приведенной относительной деформации, см. выражение (1).

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{np} - \varepsilon}{\varepsilon_{np}}, \quad (1)$$

где  $\bar{\varepsilon}$  – приведенная относительная деформация,  
 $\varepsilon_{np}$  – предельное значение линейной деформации при разрушении,  
 $\varepsilon$  – текущее значение линейной деформации.

Преобразованная кривая имеет два перегиба и две асимптоты, соответствующие начальному и предельному состоянию образцов при деформировании. Такая кривая (рис. 2) хорошо описывается экспоненциально-степенной функцией вида

$$\bar{\varepsilon} = \exp(-A \cdot \sigma^N), \quad (2)$$

где  $\sigma$  – напряжение сжатия,

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

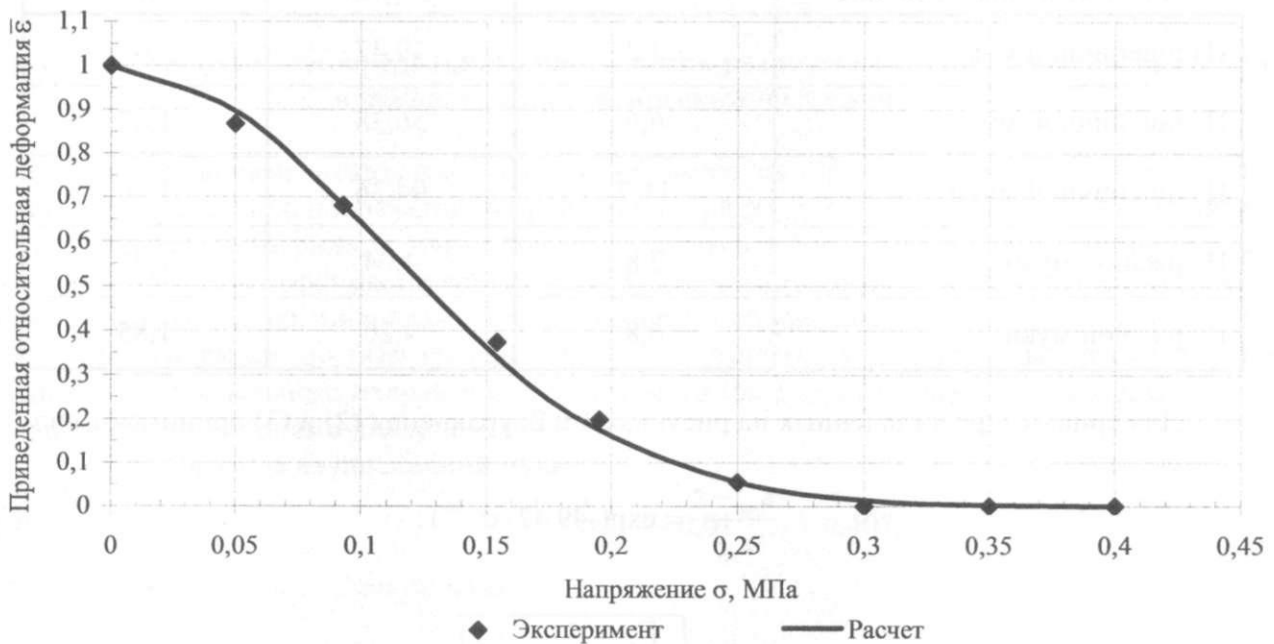


Рисунок 2 – Приведенная кривая деформирования образцов высушенных хлебобулочных изделий из пшеничной муки с влажностью 3,2%

Экспериментальные данные, представленные на рисунке 1, можно описать уравнением вида (3), полученного после несложных преобразований выражения (2):

$$\sigma = \sqrt[N]{\ln \left[ \left( \frac{\varepsilon_{np}}{\varepsilon_{np} - \varepsilon} \right)^{\frac{1}{A}} \right]}. \quad (3)$$

Для определения параметров  $A$  и  $N$  в уравнениях (2) и (3) необходимы две пары опытных значений:  $\bar{\varepsilon}_1(\sigma_1)$  и  $\bar{\varepsilon}_2(\sigma_2)$ . Эти значения определяют по приведенной кривой деформирования (рис. 2). Причем значения выбирают на участке кривой, близкой к прямой

линии, что соответствует  $\bar{\varepsilon}_1(\sigma_1) = 0,46...0,68$  и  $\bar{\varepsilon}_2(\sigma_2) = 0,02...0,16$ , В этом случае выражение (2) сводится к системе из двух уравнений относительно  $A$  и  $N$ , решая которые получим:

$$N = \frac{\ln\left(\frac{\ln\frac{1}{\bar{\varepsilon}_1} / \ln\frac{1}{\bar{\varepsilon}_2}}{\ln(\sigma_1/\sigma_2)}\right), \quad (4)$$

$$A = \frac{1}{\sigma_1^N} \ln\frac{1}{\bar{\varepsilon}_1}. \quad (5)$$

Значения параметров  $A$  и  $N$  для различных сортов хлебобулочных изделий в зависимости от влажности сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Расчетные значения констант  $A$  и  $N$  в уравнениях (2) и (3)

Сорт высушенных хлебобулочных изделий	Влажность, %	Расчетные значения констант	
		$A$	$N$
Из пшеничной муки	3,2	49,47	2,05
Из пшеничной муки	6,6	56,38	1,87
Из пшеничной муки	11,7	94,36	1,76
Из ржаной муки	2,8	4,04	1,91
Из ржаной муки	6,8	4,20	1,85

Для кривых, представленных на рисунках 1 и 2, уравнения (2) и (3) принимают вид

$$\frac{\varepsilon_{np} - \varepsilon}{\varepsilon_{np}} = \exp(-49,47 \cdot \sigma^{2,05}), \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt[2,05]{\ln\left[\left(\frac{\varepsilon_{np}}{\varepsilon_{np} - \varepsilon}\right)^{\frac{1}{49,47}}\right]}. \quad (7)$$

В настоящее время большое внимание уделяется качеству готового продукта, полученного путем измельчения. В частности, при измельчении получают полидисперсный материал (сахарную крошку) с широким разбросом частиц по диаметру. Технологический регламент и ГОСТ [7] требуют получения готового продукта (панировочных сухарей) со строго заданным фракционным составом.

Как известно, влажность оказывает существенное влияние на физико-механические свойства материала (прежде всего на хрупкость), которые, в свою очередь, влияют на степень измельчения и на качественный показатель дисперсного состава готового продукта [8].

Обобщение опытных данных по пределу прочности при сжатии образцов белого и черного хлеба при различной влажности приведены на рисунке 3.

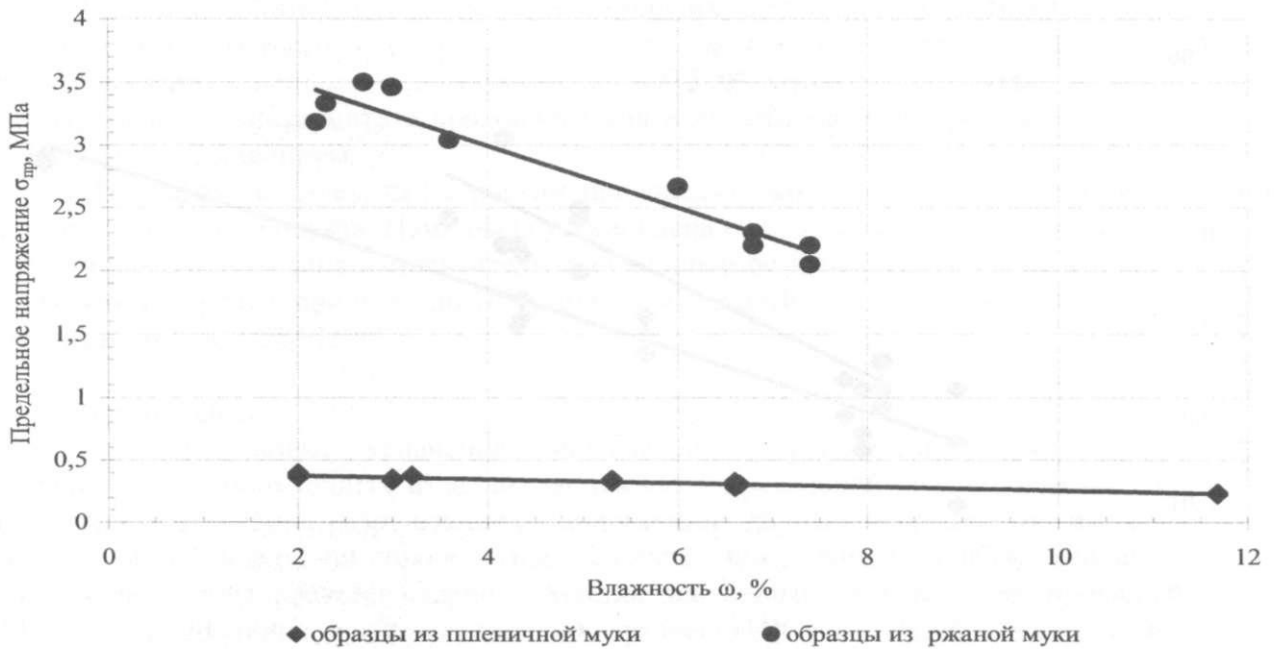


Рисунок 3 – Зависимость предельного напряжения разрушения испытуемых образцов от влажности при статическом нагружении

Анализ кривых показывает, что для образцов из пшеничной и ржаной муки резко снижается предельное напряжение разрушения (порядка 30% для образцов из пшеничной и 40% для образцов из ржаной муки) при увеличении влажности, в то время как предельные значения линейной деформации растут (рис. 4). Образцы из белого пшеничного хлеба менее чувствительны к изменению влажности и дольше сохраняют хрупкость.

На основании анализа экспериментальных данных были получены математические зависимости предельного напряжения испытуемого продукта от влажности, которые можно представить уравнениями линейного вида:

– для образцов из пшеничной муки

$$\sigma_{\text{пр}} = -0,0151\omega + 0,407, \quad (8)$$

– для образцов из ржаной муки

$$\sigma_{\text{пр}} = -0,2469\omega + 3,983. \quad (9)$$

Величина достоверности аппроксимации эмпирических функций для данных образцов составляют  $R^2 = 0,8595$  и  $R^2 = 0,9286$  соответственно.

Зависимости предельной деформации высушенных хлебобулочных изделий от влажности для образцов из пшеничной и ржаной муки представлены на рисунке 4.

Анализ графиков на рисунке 4 показывает, что величина предельной деформации имеет линейную зависимость от влажности исследуемого продукта и может быть описана уравнениями вида

– для образцов из пшеничной муки

$$\varepsilon_{\text{пр}} = 0,0034\omega + 0,0104, \quad (10)$$

– для образцов из ржаной муки

$$\varepsilon_{\text{пр}} = 0,005\omega + 0,0098. \quad (11)$$

Величина достоверности аппроксимации полученных функций для данных образцов составляет  $R^2 = 0,8871$  и  $R^2 = 0,8313$  соответственно.

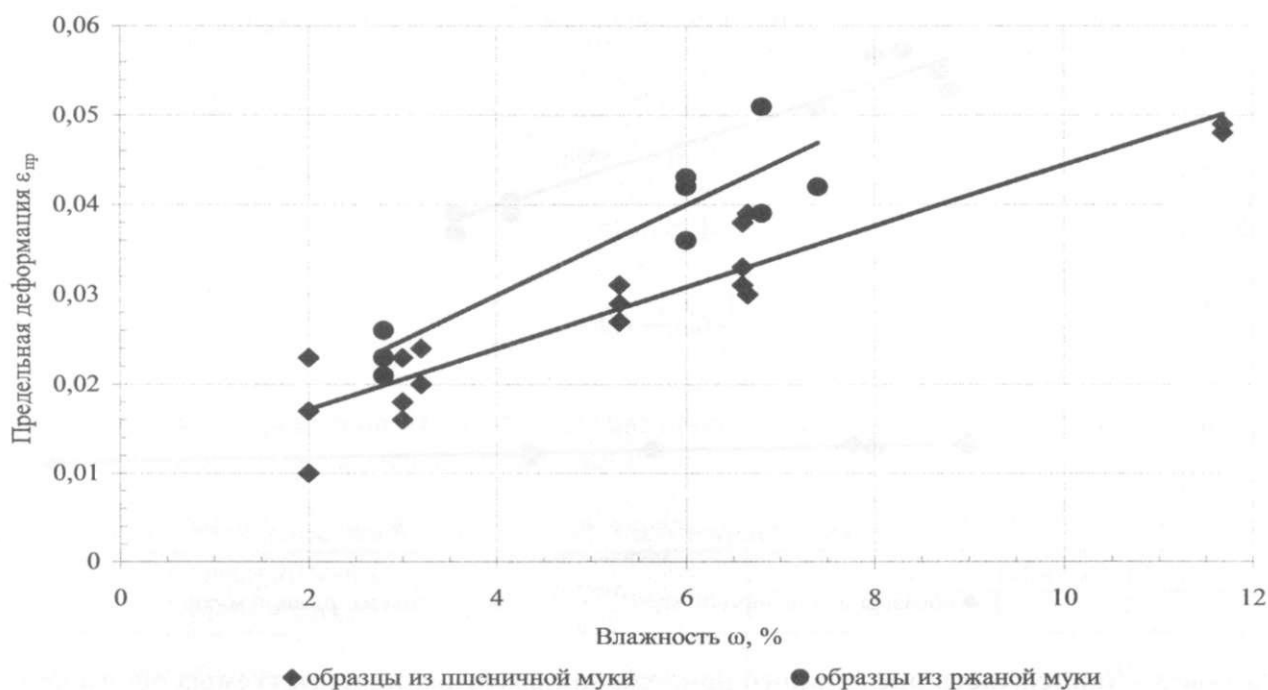


Рисунок 4 – Зависимость предельной деформации высушенных хлебобулочных изделий от влажности при статическом нагружении

Как известно, продукты переработки черствых хлебобулочных изделий широко используют в производстве панировочных сухарей, в приготовлении теста для выпечки нового хлеба с использованием черствого хлеба до 5% к общей массе теста, а также при создании новых видов хлебных полноценных изделий, отвечающих современным требованиям гигиены питания.

Согласно ГОСТ 28402-89 крупность помола для панировочных сухарей из хлеба высшего, первого и второго сорта на сите с размером ячейки 1,2 мм должна составлять не более 5,0 %, при массовой доле влаги не более 10,0 %.

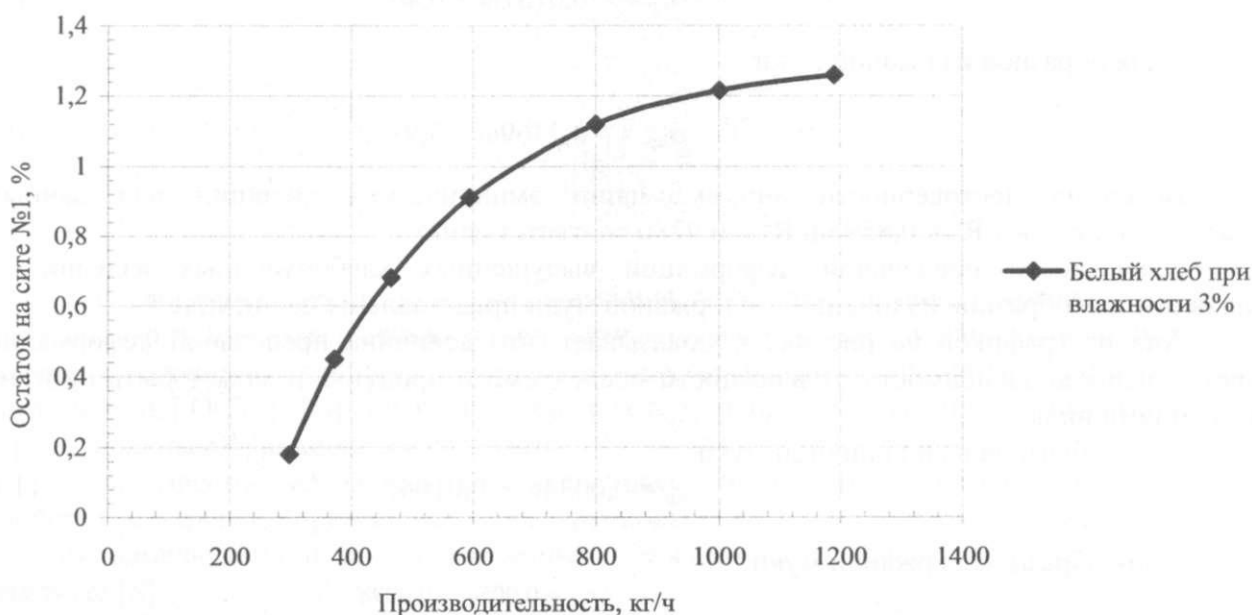


Рисунок 5 – Зависимость остатка на сите 1 мм от производительности измельчителя

Величина остатка на сите зависит от многих параметров, в частности от влажности образцов и производительности измельчителя. На рисунке 5 представлены результаты производственных испытаний измельчителя "ИХ-500", который был создан в Могилевском государственном университете продовольствия и смонтирован на производствах №2 и №4 РУПП «Могилевхлебпром».

Из графика следует, что с ростом производительности растет доля частиц крупной фракции готового продукта. Нами была установлена оптимальная производительность в 500-600 кг/ч для данного типа измельчителя, при которой остаток на сите не превышает 1% при влажности исходного продукта до 10%, при этом готовый продукт полностью соответствует требованиям ГОСТ 28402-89.

### Заключение

Получены новые уравнения, описывающие процесс статического разрушения высушенных хлебобулочных изделий, зависимость предельной деформации и зависимость предельных значений разрушающих напряжений данных изделий от их влажности. Результаты исследований прочностных свойств высушенных хлебобулочных изделий использованы при расчете ударного усилия на концах бил и проектировании новой конструкции дробилки для панировочных сухарей "ИХ-500". Разработана, изготовлена и внедрена в промышленную практику роторная дробилка "ИХ-500" на РУПП "Могилевхлебпром" в цехе по производству панировочных сухарей. Новая дробилка применена вместо устаревшей кормодробилки КДУ-2. Расход энергии на процесс измельчения (при одинаковой производительности) снижен в два раза. Готовый продукт (панировочные сухари) соответствует ГОСТ 28402-89.

### Литература

1. Измельчитель: пат. 2052291 РФ, МПК7 В02 С13/14. / Л.А. Сиваченко, Н.Г. Селезнев, В.А. Шуляк, М.В. Лещева, В.Н. Башаримова; заявитель Научно-технический кооператив "Млын" – № а 5047857/33; заявл. 15.06.1992 // Бюл. изобретений – 1996. – №6.
2. 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.
3. 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.]. – Могилев: УО "МГУП", 2006. – С. 5-10.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Сухари панировочные. Общие технические условия: ГОСТ 28402-89. – Введ. 01.01.91. – Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1990. – 6 с.
8. 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.

*Поступила в редакцию 27. 03. 2007*