

УДК 621.926

## ТОНКОЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ СТЕКЛОБОЯ В ПЛАНЕТАРНОЙ МЕЛЬНИЦЕ

канд. техн. наук Д.Н. БОРОВСКИЙ, канд. техн. наук, доц. А.А. ГАРАБАЖИУ,  
канд. техн. наук, доц. О.А. ПЕТРОВ

(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

канд. техн. наук, доц. Д.В. СЕМЕНЕНКО

(Филиал «Научно-технический центр» ОАО «НПО Центр», Минск)

*Исследуется сухой помол стеклобоя в эффективной планетарной мельнице. Дан анализ процесса переработки стекла в промышленности, оценены возникающие при этом проблемы. Показано, что это приведет к экономии как сырья, так и используемой при этом энергии. Описаны силовые воздействия, возникающие в планетарной мельнице. Представлены результаты экспериментальных исследований по измельчению стеклобоя для разных комбинаций начальных параметров. На основании анализа фракционного состава измельченных продуктов даны рекомендации по рациональной загрузке помольных стаканов планетарной мельницы.*

**Ключевые слова:** планетарная мельница, измельчение, бой стекла, загрузка мельницы, объем стакана, мелющее тело, усилие, воздействие, фракционный состав.

**Введение.** В последнее время наиболее актуальной задачей в различных отраслях промышленности является переработка и утилизация отходов стекла. Переработанное стекло легко возвращается в производственный цикл при изготовлении различных видов листового и бутылочного стекла, теплоизоляционного волокна и иных строительных материалов на его основе. Помимо экономии сырья введение стекловолокна в состав стекольной шихты снижает ее температуру плавления и уменьшает время варки, что позволяет экономить до 10% электроэнергии, затрачиваемой на процесс.

В Республике Беларусь стеклобой применяется в сравнении с другими странами сравнительно недавно, поэтому рациональный подход к переработке сырья и использованию его в технологических целях достаточно актуален. Стекло относится к высокоабразивным материалам средней прочности, не меняющим своих свойств с увеличением влажности.

Одними из помольных агрегатов для тонкого измельчения стекла являются мельницы с шаровой загрузкой различных конструкций [1; 2], наиболее эффективные из них – планетарные мельницы.

Планетарные мельницы относятся к быстроходным измельчающим агрегатам барабанного типа. В отличие от классических шаровых их размольные барабаны вовлечены в сложное движение: вращение вокруг собственных осей и вокруг общей оси мельницы. Преобладающими силовыми факторами, влияющими на эффективность помола, в планетарных мельницах становятся инерционные силы, которые значительно превышают силу тяжести [3]. При этом инерционные силы представлены в виде двух составляющих. Одна из них связана с переносным движением барабана вместе с загрузкой, а вторая – с относительным движением самой загрузки. На протяжении одного оборота водила направление этих сил изменяется в разных фазах. Исходя из этого диапазон изменения динамических нагрузок в элементах конструкции планетарной мельницы также может быть довольно большим. Но одновременно такое изменение основных силовых факторов способствует усложнению траектории движения элементов загрузки. В совокупности со значительным увеличением модуля суммы инерционных сил прогнозируется и повышение эффективности измельчения материалов в планетарной мельнице. Это повышение подтверждено экспериментально [4]. Дисперсность продукта двенадцатичасового помола, полученная в барабанной мельнице, в планетарной достигается за 2 мин. Это обусловлено, прежде всего, комплексным воздействием таких разрушающих эффектов, как раздавливание, удар и истирание, и нестационарностью процесса воздействия мелющих тел на материал. Высокая эффективность измельчения в планетарных мельницах подтверждена и зарубежными исследователями [5; 6].

Данная работа – это продолжение исследований процесса помола стеклобоя в мельницах различных конструкций [7]. Цель экспериментальных исследований – изучение процесса помола в планетарной мельнице в зависимости от времени помола, а также процентного соотношения мелющих тел и измельчаемого стеклобоя. Эффективность помола оценивалась по фракционному составу, который был получен на рассеивающей машине фирмы Retsch AS 200 (Германия) с набором сит 20, 40, 80, 100 и 200 мкм.

**Основная часть.** В качестве объекта для экспериментальных исследований была выбрана вертикальная планетарная мельница периодического действия (рисунок 1) с максимальной угловой скоростью стаканов  $\omega = 140$  рад/с. Ее основные геометрические параметры помольных стаканов следующие:

$D_B = 120$  мм,  $L_B = 90$  мм, расстоянием между осями стаканов – 260 мм,  $k = 0,24$  и  $b = 1,7$ . Стаканы заполнялись мелющими телами и измельчаемым материалом в различном объемном соотношении.

Барабаны и шары являются важной частью конструкции планетарных мельниц, т.к. непосредственно принимают участие в помоле материала. Поэтому они должны выдерживать большие нагрузки, быть термически и химически устойчивыми и износостойкими. В связи с этим для проведения экспериментов применялись мелющие тела  $d_{шл} = 18$  мм, выполненные из стали ШХ15, и стаканы – из стали 45.

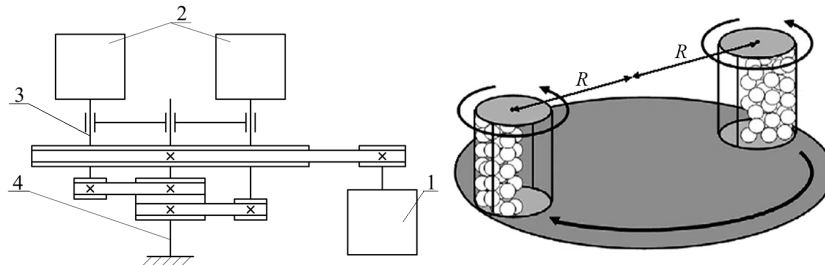
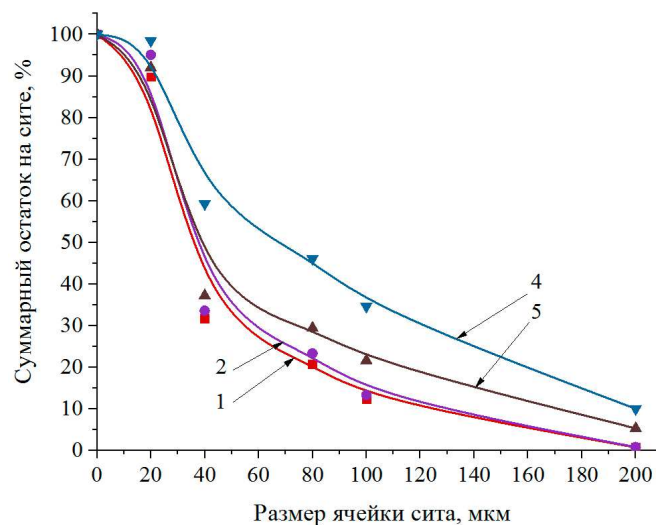


Рисунок 1. – Кинематическая схема планетарной мельницы

Помол стеклобоя осуществлялся в течение трех промежутков времени – 5, 10 и 15 мин, и при различном процентном соотношении мелющих тел к измельчаемому материалу – 1:1, 1:0,8; 1:0,5 и 1:0,3.

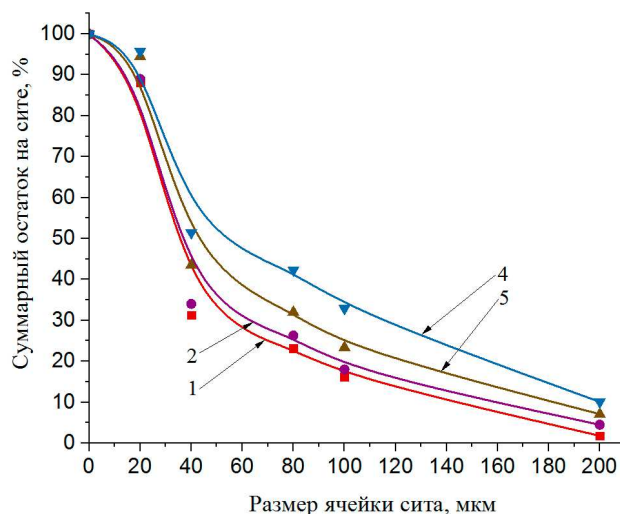
По результатам экспериментов были выполнены графические зависимости фракционного состава продукта для разных комбинаций начальных параметров (рисунки 2–4). Суммарную характеристику крупности материала в виде кривой строим «по плюсу», т.е. по суммарному остатку материала на ситах, начиная с самых крупных. При этом на оси абсцисс в масштабе откладывается размер отверстий сит, на которых производился ситовый анализ, а на оси ординат – суммарный остаток на ситах.

Из полученных графических зависимостей видно, что при увеличении степени заполнения измельчаемым продуктом помольных стаканов при фиксированном проценте мелющих тел тонина готового порошка увеличивается. Причем дисперсность готового продукта при соотношении 1:1 и 1:0,8 при 5 мин измельчения практически идентична (рисунок 2), заметные отличия наблюдаются только при помоле свыше 10 мин (рисунки 3 и 4). При степени заполнения 1:1 и 1:0,8 остаток на сите 200 мкм практически отсутствует и составляет в зависимости от времени 0,7–5,1%. В данном случае в помольном стакане на материал воздействуют большие раздавливающее, истирающее и ударное усилия. В то же время для соотношений 1:0,5 и 1:0,3 остаток повышается – 5,3–10,7%. Это связано с тем, что при меньшем количестве материала может наблюдаться отсутствие контакта с мелющими телами и, как следствие, не будет происходить его измельчение.



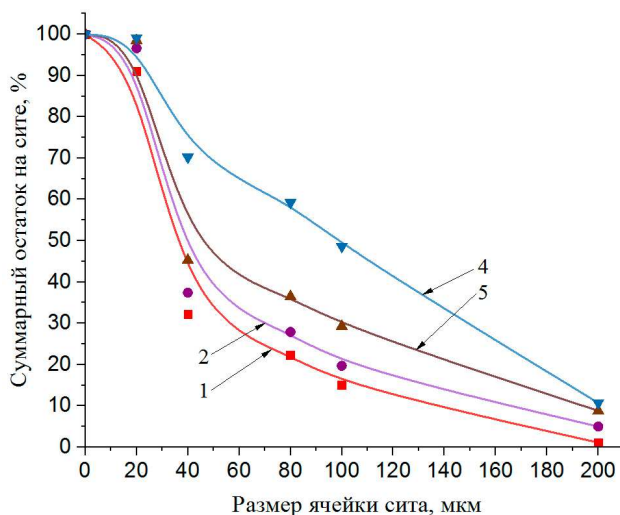
1 – соотношение мелющих тел к материалу 1:1; 2 – 1:0,8; 3 – 1:0,5; 4 – 1:0,3

Рисунок 2. – Фракционный состав измельченного стекла при помоле 5 мин



1 – соотношение мелющих тел к материалу 1:1; 2 – 1:0,8; 3 – 1:0,5; 4 – 1:0,3

Рисунок 3. – Фракционный состав измельченного стекла при помоле 10 мин



1 – соотношение мелющих тел к материалу 1:1; 2 – 1:0,8; 3 – 1:0,5; 4 – 1:0,3

Рисунок 4. – Фракционный состав измельченного стекла при помоле 15 мин

**Заключение.** Полученные результаты экспериментов позволили оценить эффективность процесса измельчения стеклобоя в планетарной мельнице. Построенные по экспериментальным данным графики наглядно показывают, что для достижения наибольшего процента частиц с размером меньше 100 мкм целесообразно применять соотношение мелющих тел к материалу как 1:1.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вайтехович, П.Е. Интенсификация и моделирование процессов диспергирования в поле инерционных сил / П.Е. Вайтехович. – Минск : БГТУ, 2008. – 220 с.
2. Семененко, Д.В. Влияние конструктивных и технологических параметров горизонтальной планетарной мельницы на эффективность процесса измельчения : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д.В. Семененко ; Беларус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2014. – 20 с.
3. Вайтехович, П.Е. Разрушающее воздействие мелющих тел в горизонтальной планетарной мельнице при различных способах обкатки помольных барабанов / П.Е. Вайтехович, Д.Н. Боровский // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2019. – № 2. – С. 3–6.
4. Голосов, С.И. Центробежная планетарная мельница, ее технические возможности и применение в практике геологических исследований / С.И. Голосов, В.И. Молчанов // Физико-химические измельчения минералов в процессе сверхтонкого измельчения : сб. науч. ст. – Новосибирск : Наука, Сиб. отд., 1966. – С. 5–25.

5. Kompakt angebaute Planetenmühle zerkleinert kontamination frei // Maschinenmarkt. – 1997. – Jhrg. 103, no. 26. – P. 41.
6. Planeten-Kugelmuhlen // CITplus. – 2003. – Jhrg. 6, no. 7. – P. 33.
7. Гребенчук, П.С. Тонкое измельчение стеклобоя в мельницах различных конструкций / П.С. Гребенчук, Д.Н. Боровский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2018. – № 3. – С. 79–83.

Поступила 18.11.2019

#### FINE GRINDING OF A GLASS BAR IN A PLANETARY MILL

**D. BOROVSKIY, A. HARABAZHYU, O. PETROV, D. SEMENENKO**

*Investigate the dry grinding of cullet in an efficient planetary mill. An analysis is given of the glass processing process in industry, and the problems arising from this are evaluated. It is shown that this will lead to savings both in raw materials and in the energy used for this. The force effects arising in a planetary mill are described. The results of experimental studies on the grinding of cullet for various combinations of initial parameters are presented. Based on the analysis of the fractional composition of the crushed products, recommendations are given on the rational loading of grinding glasses of a planetary mill*

**Keywords:** *planetary mill, grinding, glass breaking, mill loading, cup volume, grinding body, force, impact, fractional composition.*