

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ВТОРИЧНОГО СТЕКЛА (СТЕКЛА ДРОБЛЕННОГО)

*Лагун Д. И., студ., Шитикова А. А., студ., Зими́на Е. Л., к.т.н., доц.*

*Витебский государственный технологический университет,  
г. Витебск, Республика Беларусь*

Реферат. Для получения качественного готового продукта в виде стекла дробленого, полученного путем дробления стекла, извлекаемого из отходов электрического и электронного оборудования, и расширения области его применения в статье представлены технологический процесс получения, область применения в зависимости от фракционного состава. Путем экспериментальных исследований установлены оптимальные режимы работы измельчительного оборудования.

Ключевые слова: бытовые отходы, отходы стекла, дробление стекла, вторичные материальные ресурсы (ВМР), рециклинг отходов.

Рост уровня использования стеклобоя должен обуславливаться созданием эффективных систем его сбора от населения. Большое внимание должно также уделяться выделению стеклобоя из бытовых отходов, так как процент попадания его в бытовые отходы значителен. Эффективному использованию стеклобоя может способствовать организация специализированных предприятий по его обработке, на которых будет осуществляться его измельчение, очистка и сортировка. Необходимо также развивать рациональные направления использования стеклобоя, позволяющие экономить первичное сырье.

Из стекла, извлекаемого из отходов электрического и электронного оборудования, можно получить стекло дробленое, которое в дальнейшем может служить сырьем для производства жидкого стекла, стеклянных шариков, стекловолокна, декоративно-облицовочной плитки, строительных и облицовочных кирпичей, бетона и изделия из него, пеностекла или дорожного покрытия.

Стекло дробленое получают путем измельчения компонентов электрического и электронного оборудования. Соответственно процесс подготовки заключается в его измельчении (дроблении). В зависимости от необходимой фракции входа и выхода стекла, мощности выбирается вид дробилки. Существует пять типов стеклодробилок: щековая дробилка, молотковая дробилка, валковая дробилка, ударная дробилка и составная дробилка.

Вопрос рациональной подготовки стеклобоя, а именно его тонкий помол с минимальным удельным расходом электроэнергии, является актуальным для многих предприятий Беларуси. Стекло относится к высокоабразивным материалам средней прочности, не меняющим своих свойств с увеличением влажности.

ООО «Западная перерабатывающая компания» является организацией, осуществляющей сбор электронного и электрического оборудования, пришедшего в негодность. Технологический процесс производства вторичного сырья (стекла дробленого) на данном предприятии состоит из следующих стадий:

- сбор бытовой техники, транспортировка, приемка, механическая разборка;
- сортировка (для изготовления стекла дробленого не допускается использование компонентов из полиметилметакрилата (органического стекла) и из других полимеров, входящих в состав отходов электрического и электронного оборудования);
- складирование;
- дробление (дробление стеклянных компонентов, получаемых в процессе использования (переработки, утилизации, демонтажа, сортировки, разбора) отходов электрического и электронного оборудования различного назначения (бытовой техники, представленной стиральными машинами, холодильниками, духовыми шкафами и другими подобными изделиями; оргтехники, представленной сканерами, ноутбуками и другими подобными изделиями), содержащих в своем составе стеклянные компоненты (двери стеклянные, полки стеклянные, экраны стеклянные и т. д.);
- упаковка (отгружают без упаковки или по согласованию с покупателем упаковывают в контейнеры упаковочные полипропиленовые), маркировка (транспортная маркировка производится согласно ГОСТ 14192-96 «Маркировка грузов», допускается по согласованию

с покупателем транспортную маркировку не наносить);

– приемка (стекло дробленое принимают партиями, партией считается количество продукции до 5 т, сопровождаемое одним документом о качестве. Каждая партия продукции подвергается приемо-сдаточным испытаниям, а именно массовая доля остатков на ситах с отверстием D должна быть не более 10 %;

– подготовка и отгрузка готовой продукции.

При этом количество стадий дробления будет зависеть от требуемого фракционного состава конечного продукта, который в свою очередь влияет на область применения полученного ВМР.

Готовый продукт представляет собой стеклянную крошку, которая сохраняет в своей основе состав, свойства перерабатываемых стеклянных компонентов, извлеченных из отходов электрического и электронного оборудования, полученное путем измельчения стеклянных компонентов электрического и электронного оборудования с последующим рассевом продуктов измельчения.

Полученная фракция, размер крошки указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Фракция, размер крошки стекла дробленого

Фракция	Размер крошки от d до D, мм
1–25	от 1 до 25
1–10	от 1 до 15
1–5	от 1 до 5

Стекло дробленое по физико-химическим показателям соответствует нормам, указанным в таблице 2.

Таблица 2 – Физико-химические показатели стекла дробленого

Наименование показателя	Значение показателя
Массовая доля остатков на ситах с отверстием D, % не более	10

Так как конечным продуктом, подлежащим реализации, является стекло дробленое, оптимизация технологии изготовления его будет заключаться в получении массы равномерной фракции частиц стекла. Как уже отмечалось ранее, фракционный состав стекла будет влиять на дальнейшую область применения данного продукта. В таблице 3 представлены размеры частиц дробленого стекла в зависимости от области их применения.

Таблица 3 – Фракционный состав дробленого стекла в зависимости от области применения

Область применения	Конечный продукт	Необходимая (рекомендуемая) фракция, мкм (мм)
стекольная промышленность	жидкое стекло	2000–20000 (2–20)
	стеклянные шарики	5–1500 (0,005–1,50)
	стекловолокно	45–4000 (0,045–4)
производство изоляционных и строительных материалов	декоративно-облицовочная плитка	не более 0,5–1,0 (0,0005–0,001)
	строительные и облицовочные кирпичи	не более 30 (0,03)
	бетон и изделия из него	не более 40–60 (0,04–0,06)
	пеностекло	не более 100 (0,10)
автодорожное строительство	дорожное покрытие	не более 70–160 (0,07–0,16)

Примечание: разработано авторами на основании источников [1–7]

Исходя из данных таблиц 1 и 3 видно, что дробленое стекло полученного фракционного состава имеет ограниченную область применения, а именно в стекольной промышленности при получении жидкого стекла и стекловолокна. Для расширения области применения полученного продукта необходимо ввести в технологический процесс дополнительную операцию – тонкодисперсный помол, т. е. увеличить количество стадий дробления.

Основные параметры любого измельчительного оборудования обеспечивают возможность получать частицы стекла необходимого размера, однако не дают полного представления о процессе дробления. Актуальными остаются вопросы продолжительности процесса воздействия ротора на стеклобой, повышения производительности работы измельчителя за счет увеличения частоты вращения ротора, и качества получаемого

дробленого стекла при определенных параметрах процесса дробления.

Для решения перечисленных вопросов решаются следующие задачи:

- исследовать технологический процесс дробления;
- установить степень влияния исследуемых технологических параметров процесса дробления на фракционный состав готового продукта;
- определить оптимальные технологические параметры работы дробилки для получения дробленого стекла с заданными показателями качества.

Основная цель многофакторного эксперимента – получение математической модели исследуемого процесса в условиях помех со стороны неизвестных или малоизвестных факторов, кроме того, оптимизация управляемого процесса с использованием метода последовательного поиска и оценки эффективности каждого этапа исследования.

Предполагается, что в общем случае получаемая модель будет иметь вид:

$$Y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \dots + \sum b_{ii} x_i^2. \quad (1)$$

Целью определения оптимальных параметров дробления является получения стекла необходимого фракционного состава. Т. е. получить стеклянную массу с равномерными по массе и размерам частиц. Так как стекло, подаваемое в зону дробления, в большинстве имеет неправильную форму и вычислить их точную площадь (объем) не всегда получается возможным, равномерность процесса подготовки будем оценивать по массе частиц и ее вариации. В используемой при эксперименте дробилке частота вращения ножевого ротора не менее 900 мин<sup>-1</sup>, количество ножей – 3 шт., неподвижных ножей – 2 шт. Минимальный размер частиц определяется разводкой между подвижными и стационарными ножами. Следовательно, с учетом анализа влияния различных факторов свойства дробленого стекла, при проведении эксперимента в качестве входных параметров были приняты:

- длительность процесса обработки, мин,  $X_1$ ;
- частота вращения ротора, мин<sup>-1</sup>,  $X_2$ .

В качестве критериев оптимизации были приняты следующие качественные показатели дробленого стекла:

- $Y_1$  – средняя масса частиц, мм;
- $Y_2$  – коэффициент вариации по массе, %.

Для исследования технологического процесса дробления был использован план-матрица Коно. Уровни и интервалы варьирования факторов приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Интервалы и уровни варьирования факторов

Наименование фактора	Обозначение	Уровни варьирования			Интервал варьирования
		-1	0	1	
Длительность процесса обработки, мин	$X_1$	5	10	15	5
Частота вращения ротора, мин <sup>-1</sup>	$X_2$	3500	4500	5500	1000

В результате проведенных исследований получили математические модели исследуемых параметров, которые имеют следующий вид:

средняя масса частиц после измельчения

$$Y_1 = 1,5 - 0,4X_1 - 0,2X_2. \quad (2)$$

Анализ полученных данных показал (2), что средняя масса частиц стеклобоя после дробления ( $Y_1$ ) находится в линейной зависимости от длительности процесса обработки ( $X_1$ ) и от частоты вращения ротора ( $X_2$ ). Масса частиц уменьшается при увеличении длительности процесса дробления, но до определенного предела. Разводка между подвижными и неподвижными ножами является пределом дробления. Уменьшение массы можно объяснить увеличением числа ударов подвижных ножей на одну и ту же частицу в течение установленного времени. При увеличении частоты вращения ротора увеличивается скорость ножей и, следовательно, сила воздействия подвижных ножей на частицы. Чем больше это воздействие, тем меньше средняя масса частиц.

Масса частиц определялась путем их взвешивания при помощи весов аналитических ВЛА-120МА, характеристика которых представлена в таблице 5.

Коэффициент вариации по массе

$$Y_2 = 16,6 - 16,5X_1 - 6,5X_2 + 5,2X_1^2 + 2,2X_2^2 + 3,5X_1^2X_2. \quad (3)$$

Таблица 5 – Характеристика весов марки ВЛА-120МА

Показатель	Значение
Калибровка	самокалибровка
Наибольший предел взвешивания	52/120 г
Наименьший предел взвешивания	0,001 г
Дискретность	0,00001/0,0001 г
Время установления показаний, с, не более	-6/-1,5
Цена поверочного деления	1 мг
Пределы допускаемой погрешности	от 0,001г до 50г вкл. $\pm 0,5$ ; св. 50 г до 120 г вкл. $\pm 1,0$ согласно ГОСТ OIML R 76-1-2011

Коэффициент вариации по массе частиц (3) после процесса дробления уменьшается при увеличении длительности обработки исходного материала (воздействие ножей на частицы стеклобоя) ( $X_1$ ). Это объясняется тем, что увеличивается кратность воздействия измельчающих органов на частицы. С увеличением частоты вращения ротора ( $X_2$ ), увеличивается количество массы, которая заполняет пространство между ножами, подвижными и неподвижными. Центробежная сила увеличивается и заставляет движущийся поток частиц прижиматься к стенке дробилки и неподвижным ножам. Вследствие чего, в большей степени увеличивается доля частиц, которые подвергаются дроблению рабочими органами машины.

С помощью полученных математических моделей возможно определить характер влияния каждого фактора на свойства получаемого стекла. А при их рассмотрении в совокупности определить допустимые уровни факторов, которые обеспечивают возможность получения стекла дробленого с заданными свойствами.

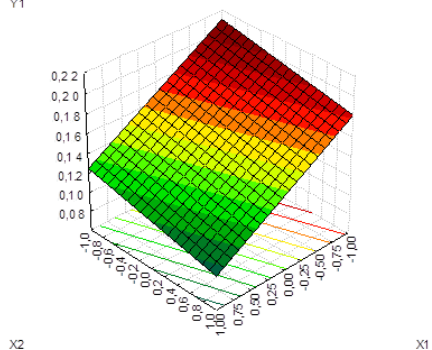
Результаты эксперимента по исследованию процесса дробления стекла в однородную массу представлены в таблице 6.

Таблица 6 – План и результаты эксперимента

№	Кодированные значения		Натуральные значения		Средняя масса частицы, г	Коэффициент вариации по массе, %
	$X_1$	$X_2$	$X_1$ мин	$X_2$ мин <sup>-1</sup>		
1	1	1	15	5500	0,10	4
2	-1	1	5	5500	0,18	36
3	1	-1	15	3500	0,12	11
4	-1	-1	5	3500	0,22	43
5	1	0	15	4500	0,11	9
6	-1	0	5	4500	0,19	38
7	0	1	10	5500	0,13	7
8	0	-1	10	3500	0,16	24
9	0	0	10	4500	0,17	17

На рисунках 1 и 2 представлены графики полученных зависимостей.

Y1

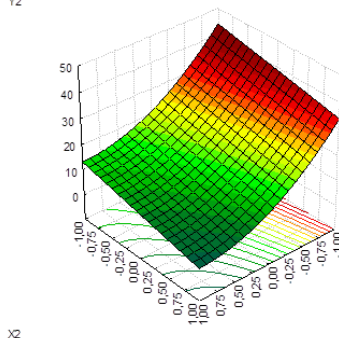


X2

X1

Рисунок 1 – Зависимость средней массы частиц  $Y_1$  от длительности воздействия ножей на материал  $X_1$  и частоты вращения ротора  $X_2$

Y2



X2

X1

Рисунок 2 – Зависимость коэффициента вариации по массе  $Y_2$  от времени воздействия на материал  $X_1$  и частоты вращения ротора  $X_2$

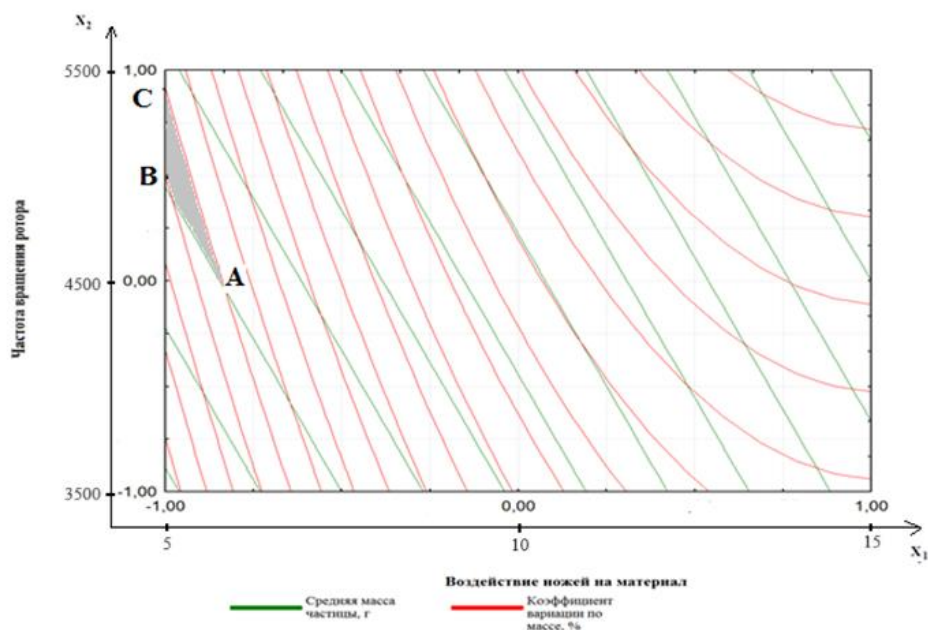


Рисунок 3 – Совмещенные графики моделей средней массы частиц и коэффициента вариации по массе

В зависимости от требуемых показателей качества получаемой массы необходимого фракционного состава следует дробить стекло с определенным сочетанием длительности обработки и частоты вращения ротора дробилки (рис. 3). В результате оптимизации получена область оптимальных значений. Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что при частоте вращения ротора 4080 мин<sup>-1</sup> в течение 6,5 минут получили дробленый материал, в котором частицы равномерны по массе 0,15 г, с коэффициентом вариации 22 %.

#### Список использованных источников

1. Мелконян, Р. Г. Экологические и экономические проблемы использования стеклобоя в производстве стекла : учебное пособие / Р. Г. Мелконян, С. Г. Власова. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2013. – 100 с.
2. Кетов, А. А. Опыт производства пеностеклянных материалов из стеклобоя / А. А. Кетов, И. С. Пузанов, Д. В. Саулин // Строительные материалы. – 2007. – № 3. – С. 70–72.
3. Мелконян, Р. Г. Опыт сбора и передачи стеклобоя за рубежом / Р. Г. Мелконян, Г. Р. Мелконян // Информационный бюллетень «Стеклянная тара». – 2000. – № 3 (9). – С. 8–9.
4. Мелконян, Р. Г. Второе рождение стекла / Р. Г. Мелконян // Технологии строительства. – 2003. – № 6 (28). – С. 52–53.
5. Дьяконов, Р. С.. Проблемы переработки и утилизации бытовой техники / Р. С. Дьяконов, Е. Л. Зимина // XXII (двадцать вторая) научная сессия преподавателей, аспирантов, магистрантов, студентов : сборник докладов XXII (двадцать второй) научной сессии, Витебск, 24 апреля 2019 г. / Витебский филиал Международного университета «МИТСО»; редкол. А. Л. Дединкин (гл. ред.) [и др.]. – Витебск, 2019. – С. 346–348.
6. Зимина, Е. Л. Технологические и теоретические основы получения материалов с использованием текстильных отходов : монография / Е. Л. Зимина, А. Г. Коган, В. И. Ольшанский ; УО «ВГТУ». – Витебск, 2019. – 230 с.
7. Власова, С. Г. Основы химической технологии стекла : учеб. пособие / С. Г. Власова. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2013. – 108 с.