

Приведены результаты экспериментов по исследованию возможности увеличения эффективности преобразования энергии высоковольтного импульсного электрического разряда в камере электрогидроимпульсной установки в механическую работу над жидкостью.

В настоящее время различные отрасли промышленности испытывают необходимость в тонкоизмельченных материалах. Задача получения порошков твердых материалов с использованием традиционных устройств решается не эффективно. Поэтому поиск новых методов тонкого измельчения твердых материалов остается весьма актуальным.

В настоящее время находит применение электрогидроимпульсная технология измельчения материалов. При импульсном электрическом разряде расширение разрядной полости приводит к возникновению ударных волн, при прохождении которых в частицах происходит возникновение и раскрытие микротрещин. Кроме того, колебания разрядной полости приводит в движение жидкость, в результате чего находящиеся в ней частицы могут истираться. Тонкому и сверхтонкому измельчению частиц способствует также возникновение кавитации жидкости [1]. В поле волны сжатия на границе кристалл – жидкость ввиду различия между сжимаемости твердого материала, могут возникать разрывы с образованием кавитационных полостей. Кавитация может возникать и в объеме жидкости и жидкости вследствие наличия свободных кавитационных зародышей и при обтекании частиц жидкостью, приведенной в движение пульсациями разрядной полости. При схлопывании кавитационных полостей возникают высокие давления и высокоскоростные микроструи, приводящие к разрушению частиц [2,3].

Согласно современным представлениям, около 50 % выделившейся в канале разряда энергии расходуется на работу совершаемую каналом над жидкостью при расширении. Оставшееся количество энергии расходуется на нагрев вещества в канале [1]. Так как измельчение частиц суспензии происходит вследствие механического воздействия среды, то с точки зрения измельчения полезной является энергия, расходуемая на работу канала при расширении. Чем больше энергии разряда преобразуется в механическую работу, тем интенсивнее происходит измельчение. В качестве критерия полноты преобразования энергии разряда в механическую работу канала над жидкостью при его расширении можно выбрать объем вытесненной из камеры жидкости за один разряд.

В настоящей работе исследована полнота преобразования энергии разряда в механическую работу в разрядных камерах различной конструкции.

Первая конструкция разрядной камеры представляла собой разрядную камеру, оснащенную линейной стержневой электродной системой с регулируемым межэлектродным промежутком и поплавковым обратным клапаном на подпитывающем патрубке. Поплавок предназначен для удерживания клапана в открытом состоянии между разрядами. При электрическом разряде клапан перемещается вниз, закрывая отверстия в нижнем патрубке, а жидкость из камеры выбрасывается через верхний патрубок в мерную емкость. Объем жидкости, оказавшейся в емкости, дает возможность судить об эффективности произведенного электрического разряда.

Исследование работы камеры проводилось при следующих параметрах: емкость конденсаторов $C=1,8 \cdot 10^{-6}$ Ф, напряжение заряда конденсаторов $U_0=25; 28; 30; 35; 40$ кВ; межэлектродный промежуток $a=4; 5; 6; 7; 8; 9$ мм. Результаты исследований приведены на рис. 1.

Анализ полученных результатов показывает, что при постоянной емкости конденсаторов и неизменном напряжении заряда величина межэлектродного промежутка влияет на объем жидкости, вытесненной из камеры. На всех уровнях напряжения наблюдается явно выраженный максимум, указывающий на наличие оптимального межэлектродного промежутка для конкретных условий разряда, что отмечено в предшествующих работах [4].

Объем вытесненной жидкости растет с увеличением напряжения заряда конденсаторов. Так максимальный объем жидкости, вытесненной из камеры при напряжении 25 кВ - 42 см³; 28 кВ – 44 см³; 30 кВ – 56 см³; 35 кВ – 68 см³; 40 кВ – 78 см³. Зависимость оптимального межэлектродного промежутка от напряжения заряда конденсаторов приведена на рис. 2 (линия 1).

Вид зависимости явно нелинейный, что не вписывается в сложившиеся представления о линейной зависимости оптимального межэлектродного промежутка от напряжения заряда конденсаторов. Поэтому есть все основания полагать, что на указанную зависимость влияют особенности конструкции камеры. Такой особенностью может быть конструкция обратного клапана, который может при разряде пропускать некоторое количество жидкости в нижний патрубок.

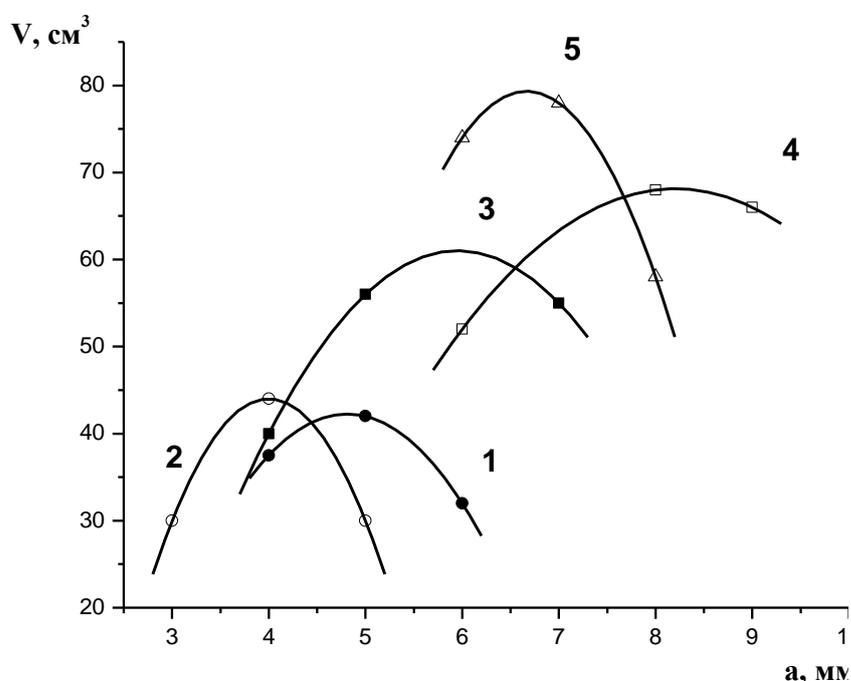


Рис. 1 Зависимость объема жидкости, вытесненной из разрядной камеры с поплавковым обратным клапаном за один электрический разряд, от величины межэлектродного промежутка при различных напряжениях заряда конденсаторов: 1 – 25 кВ; 2 – 28 кВ; 3 – 30 кВ; 4 – 35 кВ; 5 – 40 кВ.

Дальнейшие испытания установки проводились с камерой, оснащенной обратным клапаном в виде свободно лежащей пластины на отверстиях нижнего патрубка. Исследование эффективности конструкции камеры проводились при следующих параметрах: емкость конденсаторов $C=1,8 \cdot 10^{-6}$ Ф, напряжение заряда конденсаторов $U_0=25; 30; 35; 40$ кВ; межэлектродный промежуток $a=4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11$ мм. Результаты исследований приведены на рис. 3.

Анализ результатов показывает, что на каждом уровне напряжения наблюдается выраженный максимум зависимости $V=f(a)$, что говорит о наличии оптимального межэлектродного промежутка. Зависимость величины оптимального межэлектродного промежутка от напряжения выглядит как линейно возрастающая функция (линия 2 на рис. 2).

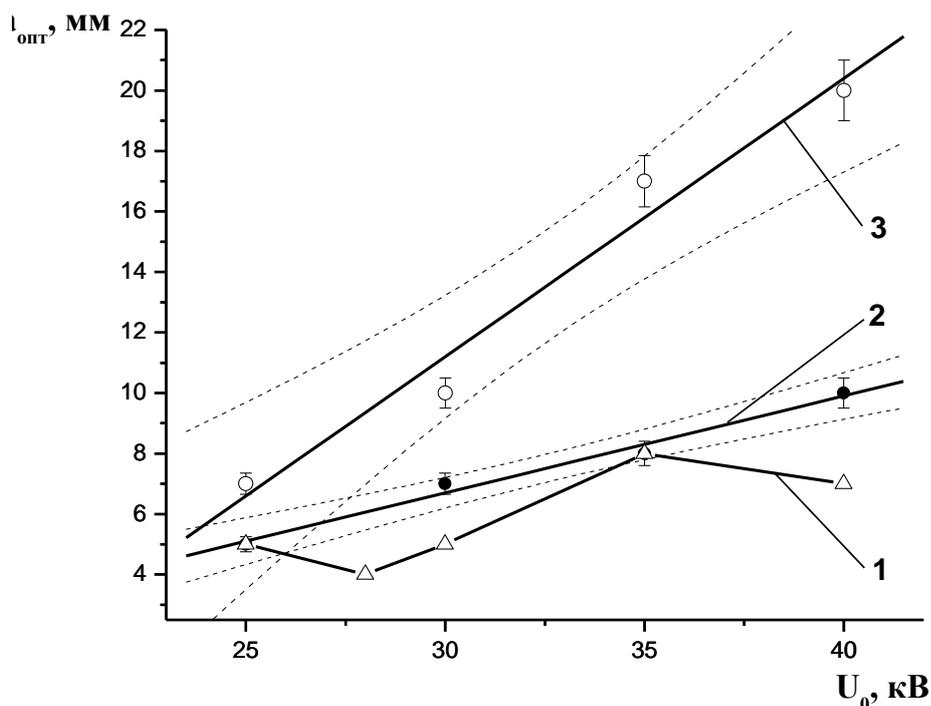


Рис. 2 Зависимость величины оптимального межэлектродного промежутка от напряжения заряда конденсаторов для камеры с поплавковым обратным клапаном (1), с клапаном в виде свободно лежащей пластины (2) и с двумя последовательными межэлектродными промежутками (3).

Максимальный объем жидкости, вытесненной из разрядной камеры в случае напряжения 30 и 40 кВ, во втором испытании увеличился соответственно 1,4 и 1,8 раза. Таким образом, изменение конструкции разрядной камеры позволило снизить утечки жидкости через клапанную систему.

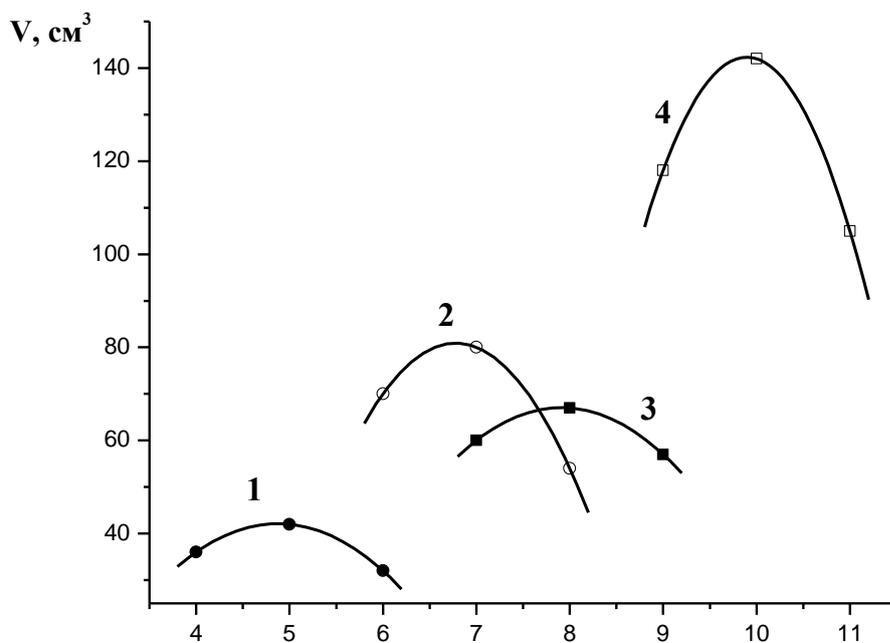


Рис. 3 Зависимость объема жидкости, вытесненной из разрядной камеры с клапаном в виде свободно лежащей пластины за один электрический разряд, от величины межэлектродного промежутка при различных напряжениях заряда конденсаторов: 1 – 25 кВ; 2 – 30 кВ; 3 – 35 кВ; 4 – 40 кВ.

Дальнейшие испытания установки проводились с камерой, оснащенной многоэлектродной системой с двумя последовательными межэлектродными промежутками, позволяющей реализовать в одной камере два синхронных электрических разряда. Межэлектродные промежутки изменялись перемещением положительного и отрицательного электродов относительно неподвижного промежуточного электрода. Результаты экспериментов приведены на рис. 4.

Из полученных результатов видно, что применение двухразрядной электродной системы привело к увеличению количества вытесненной из камеры жидкости по сравнению с электродной системой с одним межэлектродным промежутком. Так максимальный объем жидкости, вытесненный из камеры в случае напряжений 30 и 40 кВ, во втором испытании увеличился соответственно в 1,4 и 1,8 раза (см. рис. 3, 4).

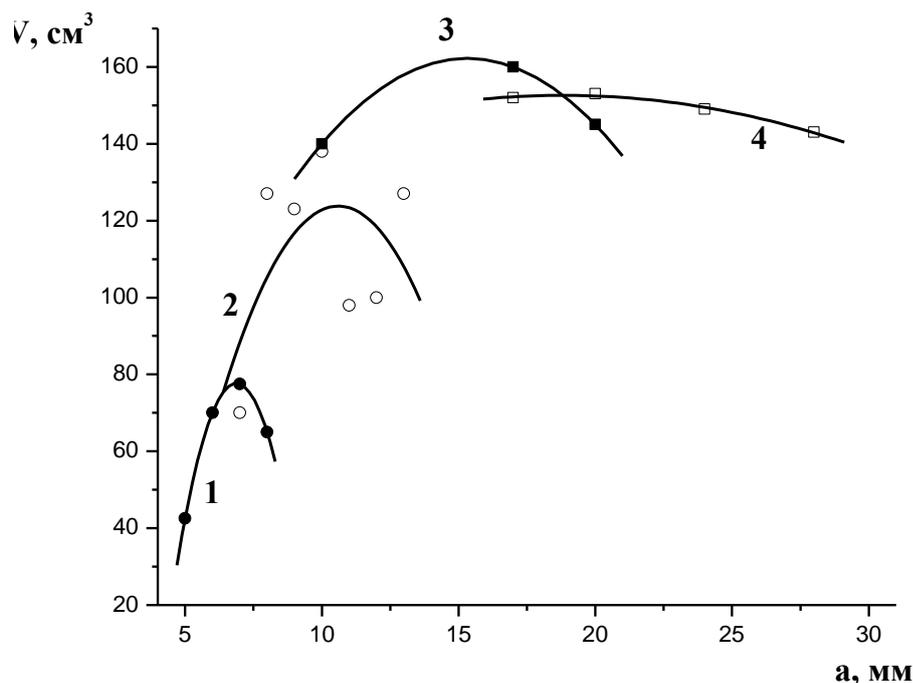


Рис. 4 Зависимость объема жидкости, вытесненной из разрядной камеры с двумя последовательными межэлектродными промежутками за один электрический разряд, от величины межэлектродного промежутка при различных напряжениях заряда конденсаторов: 1 – 25 кВ; 2 – 30 кВ; 3 – 35 кВ; 4 – 40 кВ.

Так как напряжения разряда оставались одинаковыми, то общее количество энергии, выделившейся в канале разряда, в обоих случаях оставалось одинаковым. Следовательно, применение линейной электродной системы с двойным последовательным межэлектродным промежутком позволило повысить долю выделившейся в канале разряда энергии, расходуемой на механическую работу над жидкостью.

Проведенная серия экспериментов позволила определить зависимость количества вытесненной из камеры жидкости от величины напряжения разряда на электродной системе с двойным электродным промежутком. Количественно вид данной зависимости существенно зависит от размера и формы разрядной камеры. Однако для данной разрядной камеры лабораторной электрогидроимпульсной установки на исследуемом промежутке напряжений зависимость линейна с коэффициентом корреляции $R=0,85$ и определяется соотношением:

$$V = a + b \cdot U, \quad (1)$$

где параметры $a=-29,4$; $b=4,97$.

При этом величина оптимального межэлектродного промежутка в случае электродной системы с примерно в два раза больше на всех уровнях напряжений (см. рис. 2). Линейная регрессия по точкам, полученным в результате эксперимента, позволила получить следующее выражение для зависимости оптимального межэлектродного

промежутка от напряжения разряда при использовании двойного межэлектродного промежутка:

$$a_{opt} U \approx a \cdot U + b, \quad (2)$$

где $a=0,92$; $b=-16,4$. График функции приведен на рис. 2 (линия 3). Для сравнения в случае одинарного межэлектродного промежутка коэффициент $a=0,32$, то есть тангенс угла наклона кривой увеличился в 2,9 раза.

Полученные в работе результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Использование электродной системы с двойным межэлектродным промежутком позволяет увеличить эффективность преобразования энергии разряда в энергию пульсаций разрядной полости при одном и том же уровне заряда конденсаторов.
2. Разрядные камеры проточного типа с закрытым перед разрядом обратным клапаном более эффективны по сравнению с камерами, обратный клапан которых закрывается непосредственно во время разряда. Данная конструкция позволяет снизить утечки жидкости из-за инерционности клапанной системы.
3. Величина суммарного оптимального межэлектродного промежутка линейной электродной системы с двумя последовательными межэлектродными промежутками, при которой достигается наиболее эффективное преобразование энергии разряда в механическую работу, является линейной функцией напряжения разряда. При этом, величина суммарного промежутка приблизительно в два раза больше величины одинарного оптимального промежутка.
4. Количество вытесненной из камеры жидкости при использовании линейной электродной системы с двумя межэлектродными промежутками прямо пропорциональна напряжению разряда. Однако, на количество вытесненной жидкости сильно влияют размер и форма разрядной камеры.

Литература

1. Малюшевский П.П. О механизме тонкого измельчения материалов при электрическом взрыве в ограниченном объеме // Электронная обработка материалов. – 1982. - №3. – С. 58 – 63.
2. Виноградов Б.В., Федин Д.А., Никулин Д.С. Особенности гидродинамических процессов при импульсном электрическом разряде в ограниченном объеме жидкости// Вопросы химии и химической технологии. – 2004. - №2. – С.141-146.
3. Виноградов Б.В., Федин Д.А. Влияние частоты и амплитуды ультразвуковых колебаний на интенсивность кавитации// Вопросы химии и химической технологии. – 2003. - №4. – С.150-155.
4. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. – М.: Наука, 1971. – 151 с.

УДК 66.088

Виноградов Б.В., Федин Д.А. Экспериментальное и теоретическое исследование тонкого электрогидроимпульсного измельчения материалов // Новые огнеупоры. – Москва: «Интермет инжиниринг», 2005. - №3. – С.41 – 43

У роботі приведені результати експериментального дослідження впливу характеристик матеріалу на здрібнювання за допомогою імпульсного електричного розряду у воді. Розглянуто вплив середнього розміру часток і різнозернистості матеріалу на ефективність здрібнювання. Приведено результати теоретичного дослідження механізму тонкого здрібнювання за допомогою імпульсного електричного розряду у воді. Приведено теоретичну оцінку ролі кавітації при здрібнюванні матеріалів.

The results of an experimental research of influencing of the properties of a material on grinding with the help of impulsive electric discharge in water are performed in the article. The influencing medium-sized of fragments and discontinuity of a material on efficiency of grinding is reviewed. The results of analytical investigation of the dodge of thin grinding with the help of impulsive electric discharge in water are reduced. The idealized estimation of a role of cavitation at grinding of materials is reduced.

Необходимость рассмотрения влияния характеристик измельчаемого материала на эффективность электрогидроимпульсного измельчения обусловлена тем, что электрогидроимпульсная технология положительно зарекомендовала себя при измельчении различных твердых синтетических и минеральных материалов, которые недостаточно эффективно измельчаются другими методами. Однако, физический механизм измельчения в электрогидроимпульсных установках недостаточно изучен. Углубление знаний о механизме электрогидроимпульсного измельчения позволит обеспечить рациональные конструктивные параметры разрядных камер и режимов работы установок.

Данная работа посвящена экспериментальному изучению влияния на эффективность измельчения таких характеристик гранулометрического состава порошков, как коэффициент разнозернистости, средний размер зерен, весовая доля тончайших фракций и т.д. В качестве тестового материала выступал известняк, подверженный предварительному механическому измельчению до определенной крупности.

Экспериментальные исследования проводились на лабораторной электрогидроимпульсной установке для измельчения материалов. Основные технические характеристики установки приведены в таблице 1.

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем. В разрядную камеру, заполненную жидкостью, помещалась навеска известняка

Таблица 1

Основные технические характеристики лабораторной электрогидроимпульсной установки для измельчения материалов

Характеристика	Значение
Напряжение питания, В	220
Частота питающего напряжения, Гц	50
Потребляемая мощность, кВА	0,5
Напряжение заряда конденсаторов, кВ	40
Емкость конденсаторов, мкФ	1,8
Объем разрядной камеры, л	1,5

весом 180 г (Т:Ж=1:10) известного гранулометрического состава. Материал подвергался воздействию 50 разрядных импульсов. После обработки производился ситовой анализ обработанного материала.

Данные по распределению частиц по размерам аппроксимировались с использованием логарифмически нормального закона распределения вида:

$$w = a \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{\left(\frac{\ln \frac{x}{\zeta}}{\sigma}\right)^2}{2}}, \quad (1)$$

где x – размер зерен, a – постоянная нормировки, σ – дисперсия распределения, ζ – медиана распределения.

На рис. 1 представлены кривые распределения частиц исходных навесок а, б, с, d материала по размерам и после обработки 50 разрядными импульсами. Характеристики соответствующих распределений сведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные характеристики кривых распределения частиц по размерам в исходных навесках

Навеска	a	b	c	d
Средний размер частиц, d_{cp} , мм	0,04	0,22	0,39	0,37
Коэффициент разноразмерности, J	1,91	2,18	2,47	2,15
Весовая доля фракции -0,063+0	1	0	0	0,78

Эффективность измельчения характеризовалась степенью измельчения основного класса частиц, имеющего наибольшую весовую долю, как отношением исходного содержания класса к содержанию класса в продукте измельчения. Коэффициент разноразмерности моды определялся по формуле:

$$J_i = \frac{3d_{10}}{d_{90}}, \quad (2)$$

где d_{10} , d_{90} – размер зерен, количество которых составляет соответственно 10 и 90% от общего веса навески.

Коэффициент разноразмерности при полимодальном распределении определялся по формуле:

$$J = \frac{\sum_i P_i J_i}{\sum_i P_i}, \quad (3)$$

где J – коэффициент разноразмерности, P_i , J_i – весовая доля и разноразмерность i -й фракции соответственно.

Из анализа кривых распределения видно, что в случае измельчения навесок, содержащих относительно крупные частицы (порядка долей миллиметра) продукты измельчения содержат две основные фракции частиц. Первая фракция (-0,5+0,063 мм) соответствует недоизмельченным частицам. Вторая фракция (-0,063+0 мм) соответствует вновь образовавшемуся классу. Размер вновь образовавшегося класса говорит о том, что процесс измельчения происходит путем скола или отшелушивания от крупных частиц.

На рисунке 2 представлена зависимость степени измельчения материала в зависимости от среднего размера частиц. Из характера зависимости видно, что степень измельчения практически линейно растет с уменьшением среднего размера частиц

исходной загрузки по крайней мере до размера $d_{cp}=0,039$ мм. Это свидетельствует о том, что электрогидроимпульсная технология позволяет наиболее эффективно измельчать мелкие частицы.

С целью установления зависимости эффективности процесса измельчения от разнотерности исходного материала было проведено экспериментальное измельчение материала различной разнотерности. Значения коэффициента разнотерности для исследованных навесок приведены в таблице 2. На рисунке 3 представлена зависимость степени измельчения основной фракции материала с большим ($J=2,47$), средним ($J=1,91$) и малым ($J=1,15$) значением коэффициентом разнотерности. Анализ результатов показывает, что наиболее эффективно тонкое измельчение протекает, когда исходный материал содержит большее количество частиц мельчайшей фракции. Так, при измельчении навески с с весовой долей мельчайшей фракции 0 прирост фракции $-0,063+0$ составил 8% (рис.1), а при измельчении навески d с весовой долей мельчайшей фракции 0,15 прирост составил 33%.

Параллельно с экспериментальным исследованием влияния характеристик материала на эффективность измельчения, авторами проводились теоретические исследования механизма измельчения в электрогидроимпульсных установках.

Несмотря на большое количество работ, посвященных электрогидроимпульсному измельчению, физический механизм процесса измельчения материалов в электрогидроимпульсных установках изучен еще недостаточно и остается на уровне гипотез. Существуют различные предположения относительно механизма электрогидроимпульсного измельчения. Предполагается, что основную роль в разрушении средних частиц играет волна сжатия, генерируемая каналом искрового разряда. Для более мелких частиц электровзрывной механизм разрушения сменяется кавитационным. Кроме того, жидкость, приводимая в движение пульсациями разрядной полости, перемещает суспензию, в процессе чего частицы могут истираться.

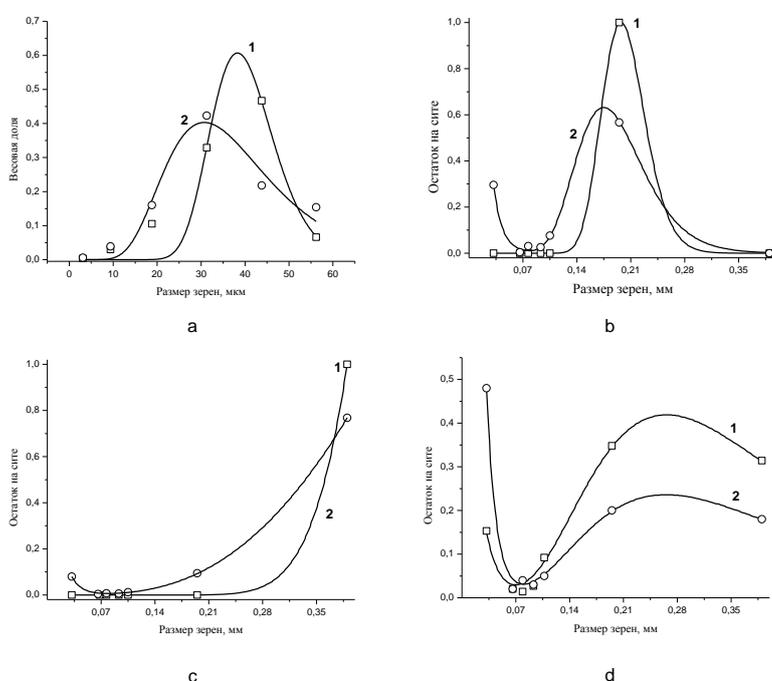


Рис. 1 Кривые распределения частиц по размерам исходные (линия 1) и после обработки (линия 2)

Для выяснения роли кавитации жидкости в электрогидроимпульсном измельчении авторы рассмотрели гидродинамические процессы в разрядной камере и динамику кавитационной полости при электрогидроимпульсном воздействии на жидкость. Характер гидродинамических процессов при импульсном электрическом разряде рассматривался с использованием модели идеальной сжимаемой жидкости, представленной уравнениями Эйлера:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \end{cases}, \quad (4)$$

и уравнением состояния жидкости в форме Тетта:

$$\frac{P+B}{P_0+B} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma, \quad (5)$$

где ρ , P – плотность и давление жидкости, ρ_0 , P_0 – начальные плотность и давление, u – скорость жидкости, γ – показатель адиабаты, принятый равным 7,15, B – константа в уравнении состояния. В качестве модели динамики кавитационной полости использовалось уравнение Нолтинга-Непайраса:

$$RR'' + \frac{3}{2}R'^2 + \frac{1}{\rho} \left(f + P_a + \frac{2\sigma}{R} - \left(P_a + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right) = 0, \quad (6)$$

где R – радиус кавитационной полости; ρ – плотность жидкости; F – внешнее воздействие; P_a – внешнее статическое давление; σ – поверхностное натяжение жидкости; R_0 – начальный радиус кавитационной полости; γ – показатель политропы.

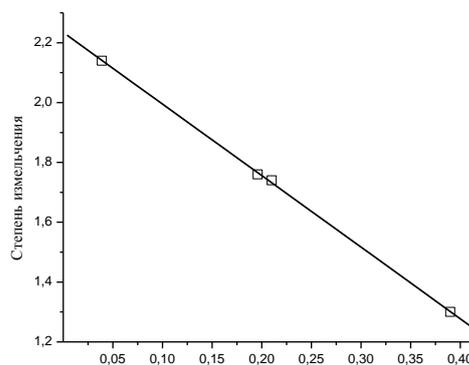


Рис. 2 Зависимость степени измельчения основной фракции от среднего диаметра частиц исходного материала: \square – экспериментальные данные, — - линия сглаживания

Результаты моделирования говорят о возможности возникновения кавитации во фронте разряжения волн сжатия, генерируемых разрядной полостью. Возникновению кавитации способствует также наличие свободной поверхности жидкости. Однако рассмотрение динамики кавитационной полости показало, что в обычных условиях не происходит интенсивное схлопывание полостей. Следовательно, кавитационное воздействие на среду незначительное. Увеличения интенсивности кавитационного воздействия можно достигнуть, обеспечив условия, когда схлопывание полости происходит при интенсифицирующем воздействии вторичных волн сжатия. этом случае в момент схлопывания статическое давление и давление в волне сжатия действуют в одном направлении. Данный эффект может быть реализован в так называемой установке сходящихся ударных волн. В этом случае последовательность двух волн сжатия, идущих с определенным промежутком времени, вызывает расширение полости во фронте разряжения первой волны и интенсивное схлопывание во фронте сжатия второй волны. В обычных электрогидроимпульсных установках ведущим фактором в механизме

электрогидроимпульсного измельчения материалов, по-видимому, является взаимодействие частиц при перемещении последних в потоке жидкости.

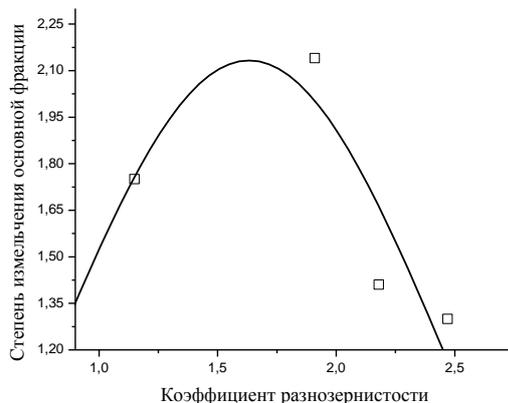


Рис. 3 Зависимость степени измельчения основной фракции от коэффициента разнозернистости: □ – экспериментальные данные, — - линия сглаживания

Таким образом, из проведенного анализа результатов экспериментального исследования влияния характеристик материала на интенсивность электрогидроимпульсного измельчения можно сделать следующие выводы:

1. С уменьшением крупности исходного материала степень измельчения увеличивается;
2. Степень измельчения зависит от разнозернистости исходного материала, причем существует разнозернистость, при которой при прочих одинаковых параметрах степень измельчения наибольшая.
3. Ведущим фактором в механизме электрогидроимпульсного измельчения материалов является взаимодействие частиц при их перемещении в потоке жидкости.

УДК 66.088

Б.В.Виноградов, Д.А. Федин, В.И. Емельяненко Эффективность измельчения порошков в составной электроразрядной камере с упругими элементами // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. - №51. – С. 99 – 105.

Приведені результати експериментального дослідження тонкого електрогидроімпульсного подрібнення порошкових матеріалів. Надано порівняльний аналіз ефективності використання суцільної та складеної розрядної камери з пружними елементами. Отримані результати підтверджують гіпотезу про провідну роль кавітаційного механізму у тонкому та надтонкому електрогидроімпульсному подрібненні твердих часток у обмеженому об'ємі рідини.

The outcomes of an experimental research of electric discharge thin grinding of powdered materials are introduced. The comparative analysis of operational effectiveness of the single-piece and composite discharge camera with elastic members is introduced. The obtained outcomes confirm a hypothesis about a carrying on role of the cavitation in thin and hyperfine electric discharge grinding of solid fragments in self-contained volume of fluid.

В настоящее время в практике тонкого и сверхтонкого измельчения порошковых материалов большое внимание уделяется использованию энергии высоковольтного импульсного электрического разряда в жидкости [1-5]. Электрический импульсный разряд в ограниченном объеме жидкости сопровождается комплексом гидродинамических процессов, приводящих к разрушению твердых частиц. Многие исследователи

предполагают, что одним из ведущих механизмов тонкого и сверхтонкого измельчения является кавитация. Электрогидроимпульсная кавитация неоднократно наблюдалась экспериментально. Однако, несмотря на то, что по некоторым оценкам энергия кавитации достаточно высока, чтобы совершать работу по разрушению твердых материалов, в настоящее время нет экспериментального подтверждения тому, что именно кавитация приводит к разрушению твердых частиц [1].

Новейшие исследования показывают, что интенсивность роста и захлопывания кавитационных полостей, а, следовательно, и кавитационного воздействия на материал, существенно зависит от условий, в которых производится разряд [2-5]. Разряд в закрытой камере сопровождается наложением прямых и отраженных волн сжатия, в результате чего образование областей пониженного давления, в которых происходит рост кавитационных полостей, мало вероятно. Разряд в камере со свободной поверхностью жидкости сопровождается возникновением интенсивных волн разрежения, приводящих к вскипанию жидкости, что не позволяет управлять интенсивностью захлопывания кавитационных полостей. Теория гидродинамических процессов при разряде в камере с подвижными границами развита недостаточно, что не позволяет представить характер зависимости интенсивности электрогидроимпульсной кавитации от динамических параметров подвижных элементов камеры.

Целью настоящей работы является теоретическое и экспериментальное исследование закономерностей электрогидроимпульсного измельчения в составной камере с упругими элементами.

Экспериментальные исследования выполнялись на электрогидроимпульсной установке для тонкого и сверхтонкого измельчения порошковых материалов с разрядной камерой, оснащенной упругими элементами. Исследуемая камера представляет собой вертикальный цилиндр, выполненный из фланцев с регулируемыми кольцевыми зазорами. В верхней части камера закрыта подпружиненным диском с возможностью вертикального перемещения.

Конструкция камеры позволяет за счет изменения массы и характеристик пружин создавать в объеме жидкости различные по амплитуде и длительности импульсы разрежения. Математическое моделирование гидродинамических процессов при высоковольтном импульсном электрическом разряде в камере с упругим элементом показало, что волна сжатия, генерируемая разрядной полостью, отражаясь от поверхности диска, приводит его в движение. В результате жидкость между отраженным фронтом и поверхностью диска растягивается. Степень разрежения в камере обратно пропорциональна массе пластины. Образующийся импульс разрежения вызывает рост и захлопывание кавитационных полостей, вызывающих разрушение твердых частиц. Кроме того, разрушение частиц происходит в зоне кольцевых канавок на торцах фланцев за счет волновых процессов, возникающих при резком расширении и сужении потока.

Камера испытывалась в пяти конфигурациях: закрытая камера (отсутствуют кольцевые зазоры, диск плотно прижат к торцу камеры); камера с кольцевыми зазорами (толщина зазоров составляла 100 мкм) камера с тяжелым поршнем (диск весом 3,5 кг поджат двумя пружинами с жесткостью 7,2 кг/мм); камера с легким поршнем (диск весом 60 г поджат 10 пружинами с жесткостью 11,8 кг/мм); камера со свободным легким поршнем (диск весом 60 г свободно лежит на торце камеры).

Методика эксперимента заключалась в следующем. Навеска тестового материала, в качестве которого выступал известняк, весом 100 г (Т:Ж=1:10) помещалась в заполненную жидкостью разрядную камеру и подвергалась воздействию 50 разрядными импульсами. Измельченный материал, оставшийся в камере и вышедший через зазоры, по отдельности подвергался микроскопическому гранулометрическому анализу.

Результаты гранулометрического анализа представлены на рис. 1-2. На рис. 1 представлены частные характеристики распределения частиц известняка до и после измельчения в продукте, оставшемся в камере. На рис. 2 представлены частные

характеристики распределения частиц известняка после измельчения в продукте, вышедшем через зазоры. Для полноты представления данных в таблице представлены основные характеристики распределения частиц.

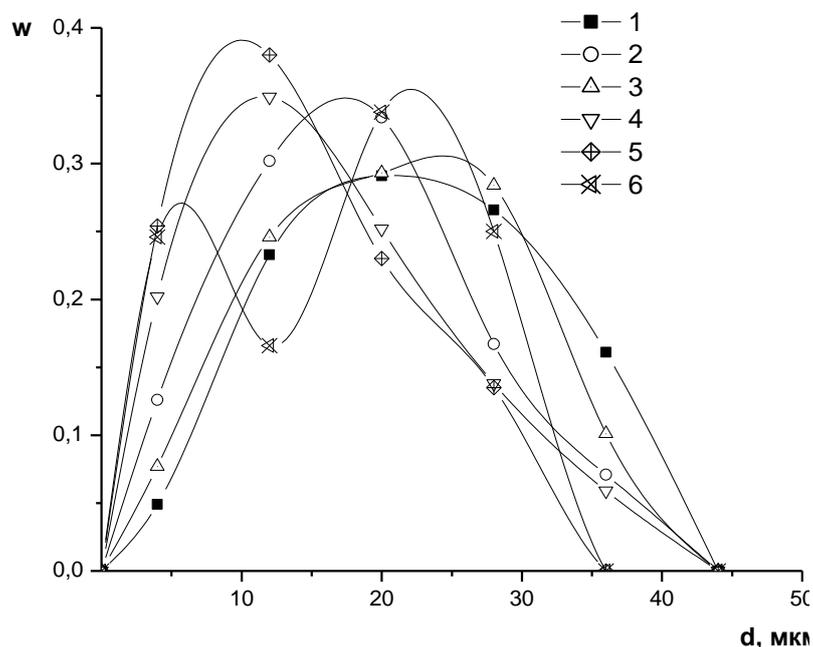


Рис. 1. Частные характеристики распределения частиц известняка (остаток в камере): 1 – исходный материал; 2 – закрытая камера; 3 – камера с кольцевыми зазорами; 4 – камера с тяжелым поршнем; 5 – камера со свободным легким поршнем; 6 – камера с легким поршнем.

Анализ данных, представленных на рис. 1 свидетельствует о том, что высоковольтный импульсный электрический разряд в камере указанных конфигураций сопровождается измельчением частиц. Однако интенсивность измельчения не одинакова. Уже через 50 разрядных импульсов в закрытой камере, камере с кольцевыми зазорами и камере с тяжелым поршнем количество крупнейшей фракции частиц со средним диаметром 36 мкм уменьшилось в 2,3, 1,6 и 2,7 раза соответственно (см. табл.). Продукт измельчения в камере с легким и легким свободным поршнем частицы крупной фракции не содержит. Процесс измельчения сопровождается ростом количества мельчайшей фракции частиц со средним диаметром 4 мкм. Количество мельчайшей фракции в продукте измельчения в камере с легким подпружиненным и легким свободным поршнем увеличилось по сравнению с исходным материалом в наибольшей степени и составило 25%. В камере с тяжелым поршнем количество мельчайшей фракции составило только 20%. В камере с кольцевыми зазорами прирост мельчайшей фракции наименьший и составляет только 3%.

Полученные данные свидетельствуют о том, что высоковольтный импульсный электрический разряд в камере с подвижным упругим элементом, реализованном в виде подпружиненной пластины позволяет более эффективно преобразовать энергию разряда в работу по разрушению распределенных в жидкости твердых частиц по сравнению с закрытой камерой.

На рис. 2 представлены частные характеристики распределения частиц известняка вышедших через зазоры. Анализ представленных данных свидетельствует о том, что импульсные электрические разряды сопровождаются выносом мелких фракций частиц через отверстия в стенках камеры. В продукте, вышедшем через кольцевые зазоры содержатся частицы всего диапазона крупностей кроме самой крупной фракции (линия 2).

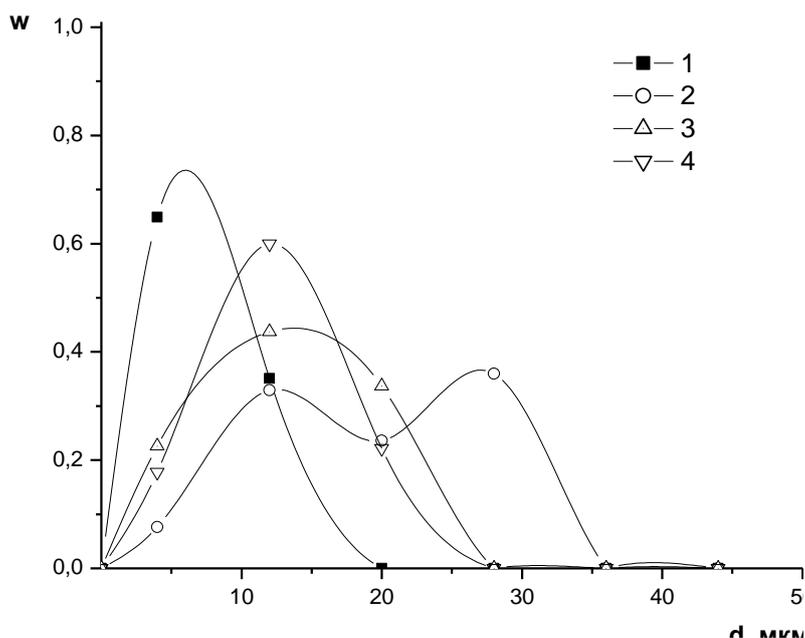


Рис. 2. Частные характеристики распределения частиц известняка (выход через зазоры): 1 – камера с тяжелым поршнем; 2 – камера с кольцевыми зазорами; 3 – камера со свободным легким поршнем; 4 – камера с легким поршнем.

Объясняется это следующим образом. При загрузке разнозернистого порошка в камеру происходит гравитационное разделение суспензии. Крупные частицы быстро оседают и попадают в зону разряда. Более мелкие частицы в течение некоторого времени распределены по объему жидкости.

Импульсный электрический разряд сопровождается течением жидкости через кольцевые зазоры. Так как зазоры расположены по всей высоте камеры, то выносу подвергаются частицы всех крупностей. Волны сжатия, генерируемые разрядной полостью, а также возникающие в кольцевых канавках способствуют измельчению частиц. Однако из всех исследованных конфигураций камера с кольцевыми зазорами наименее эффективна.

Выход из камер с поршнями содержит частицы более мелких фракций с узким диапазоном зернистостей (линия 1, 3 и 4). При этом средний размер продукта обратно пропорционален массе поршня. Если применение поршня массой 60 г и подпружиненного поршня той же массы позволило получить материал со средним диаметром частиц 12,89 и 12,35 мкм, то применение поршня массой 3,5 кг позволило получить материал со средним диаметром частиц 6,81 мкм.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что существует оптимальная величина массы поршня, позволяющая достичь наибольшей степени измельчения частиц. Кроме того, наличие зазоров способствует классификации разнозернистых суспензий и удалению из рабочего объема измельченного материала.

Полученные опытные данные согласуются с теорией о ведущей роли кавитационного механизма тонкого и сверхтонкого измельчения твердых частиц при импульсном электрическом разряде в камере с подвижными границами, разработанной авторами настоящей статьи. Согласно данной теории, волна сжатия, генерируемая разрядной полостью, отражается от поверхности поршня и приводит его в движение. При этом величина перемещения поршня обратно пропорциональна массе поршня. Находящаяся между отраженным фронтом сжатия и поверхностью поршня жидкость растягивается. Вследствие этого в камере возникает импульс разрежения, длительность и амплитуда которого тем больше, чем меньше масса клапана.

Основные характеристики гранулометрического состава порошка известняка

Материал	Остаток в камере			Выход через зазоры		
	Весовая доля мелкой фракции	Весовая доля крупной фракции	Средний диаметр частиц, мкм	Весовая доля мелкой фракции	Весовая доля крупной фракции	Средний диаметр частиц, мкм
Исходный	0,05	0,16	22,06	-	-	-
Закрытая камера	0,13	0,07	18,04	-	-	-
Камера с кольцевыми зазорами	0,08	0,10	20,71	0,08	0	19,05
Камера с тяжелым поршнем	0,20	0,06	16,02	0,65	0	6,81
Камера со свободным легким поршнем	0,25	0,14	13,96	0,226	0	12,89
Камера с легким поршнем	0,25	0,25	16,74	0,178	0	12,35

Исследование основных закономерностей динамики кавитационной полости при импульсном электрическом разряде в ограниченном объеме жидкости показывает, что существует оптимальная величина импульса разрежения, при котором кавитационная полость интенсивно захлопывается вследствие последующего повышения давления [5,6]. Если величина импульса мала, то кавитационный зародыш не успевает вырасти до достаточно больших размеров. При дальнейшем увеличении величины импульса разрежения полость под действием фронта разрежения успевает вырасти в десятки раз и в момент прихода волны сжатия захлопывается с большой скоростью. Захлопывание полости сопровождается образованием микроударных волн и высокоскоростных струй, способных разрушать твердые частицы. Дальнейшее увеличение приводит к тому, что к моменту прихода волны сжатия полость увеличивается в сотни раз и приобретает такое радиальное ускорение, что реагирует на импульс сжатия лишь кратковременным замедлением роста и ее захлопывание не происходит при интенсифицирующем воздействии импульса сжатия. Наличие подвижной границы в виде плоского поршня в разрядной камере способствует возникновению кавитации. Варьированием массы поршня можно создать условия, при которых кавитационное измельчение будет протекать наиболее интенсивно.

Таким образом, полученные теоретические и экспериментальные результаты позволяют сделать следующие основные выводы.

1. Применение электрогидроимпульсной установки с разрядной камерой, оснащенной упругим элементом в виде подпружиненного поршня, позволяет более эффективно измельчать порошковые материалы по сравнению с закрытой камерой.
2. Эффективность измельчения в камере с упругим элементом зависит от его массы.

3. Опытные данные подтверждают правильность теории о ведущей роли кавитационного измельчения при импульсном электрическом разряде в камере с упругим элементом.

Список литературы: **1.** Способ дробления сверхтвердых материалов/ Бакуль В.Н., Никитин Ю.И., Уман С.М., Виноградов В.М., Лисисца В.И., Несвитайлов Г.А. // Электронная обработка материалов. – 1976. – №2. – С.18-22. **2.** Виноградов Б.В., Емельяненко В.И., Федин Д.А. О влиянии конструкции разрядной камеры на эффективность преобразования энергии в электрогидроимпульсных установках// Вопросы химии и химической технологии. – 2005. – №1. – С.189-192. **3.** Виноградов Б.В., Федин Д.А. Экспериментальное и теоретическое исследование тонкого электрогидроимпульсного измельчения материалов // Новые огнеупоры. – 2005. – №3. – С.41-43. **4.** Виноградов Б.В., Федин Д.А. Особенности гидродинамических процессов при импульсном электрическом разряде в ограниченном объеме жидкости// Химия и химическая технология. – 2004. – №2. – С.190-192. **5.** Виноградов Б.В., Федин Д.А. О механизме сверхтонкого электрогидроимпульсного измельчения материалов// Сборник научных трудов НГУ. – 2004. – №19. – Т. 5. – С.115 - 119. **6.** Виноградов Б.В., Федин Д.А. Влияние частоты и амплитуды ультразвуковых колебаний на интенсивность кавитации// Вопросы химии и химической технологии. – 2003. – №4. – С.141-144.

УДК 621.926.086:621.921.34

Б.В. Виноградов, Д.А. Федин, В.И. Емельяненко Об использовании разрядноимпульсной технологии для получения субмикророшков синтетического алмаза // Породоразрушающий и металообработывающий инструмент, Николаев - 2005.

The results of theoretical researches of the electric discharge grinding mechanism are presented. The results of experimental researches of the electric discharge ultrafine grinding of synthetic diamond are presented.

В связи с выходом отечественных производителей порошков синтетических алмазов на мировой рынок повышаются требования к качеству продукта. Особенно данная проблема касается субмикророшков, для обеспечения качества которых необходимо обеспечивать узкий диапазон зернистостей при высокой степени помола. В то же время сверхтонкое измельчение порошков синтетического алмаза классическими методами недостаточно эффективно [1], поэтому в последнее время растет интерес к электрогидроимпульсному измельчению, преимуществами которого являются управляемость процессом измельчения и значительно меньшее загрязнение продукта. Однако удельная энергоемкость электрогидроимпульсного измельчения остается относительно высокой, что препятствует широкому внедрению в производство. Поэтому исследования в области повышения эффективности электрогидроимпульсного измельчения весьма актуальны.

Сотрудниками Института тепло- и массообмена республики Беларусь совместно с институтом сверхтвердых материалов НАН Украины проведены обширные исследования электрогидроимпульсного измельчения порошков синтетических алмазов. Разработанная установка ЭПИ-3М при измельчении микропорошков зернистостью $-5+0$ мкм при воздействии высоковольтными импульсными электрическими разрядами в количестве $n=6000$ (при условиях: емкость источника тока $C=0,6$ мкФ, напряжение заряда $U=44$ кВ) позволяет получить выход класса частиц $-2+0$ мкм в количестве 9% [1]. При этом в качестве основного механизма измельчения предполагается разрушение под действием ударных волн. Распределение энергии разряда между волной сжатия и пульсациями разрядной полости достигается изменением режима разряда. Однако в работе П.П. Малюшевского [2] показано, что в реальных электрогидроимпульсных установках частицы диаметром менее 1,5-6 мкм находятся в условиях квазистатического сжатия, что

затрудняет измельчение. Измельчение частиц диаметром 2 мкм и меньше свидетельствует о смене ударно-волнового механизма на кавитационный механизм измельчения.

Авторами настоящей статьи проведен ряд численных экспериментов по исследованию гидродинамических процессов при высоковольтном импульсном электрическом разряде в закрытой камере, камере со свободной поверхностью жидкости и камере с подвижной границей [3-7]. Исследования показали, что в разрядной камере существует ограниченная область интенсивной кавитации. Положение области зависит от величины промежутка времени между прохождением первичной и отраженной волны сжатия. Если размер камеры мал, то прямые и отраженные волны накладываются друг на друга и область интенсивной кавитации не возникает. Возникновение области интенсивной кавитации возможно при выполнении условия [8]

$$\frac{\tau \cdot c_0}{S} \ll 1, \quad (1)$$

где τ – время существенного изменения скорости роста разрядной полости, с; c_0 – скорость звука в невозмущенной жидкости, м/с; S – расстояние от центра разряда до границы камеры, м. Если учесть, что время существенного изменения скорости роста разрядной полости пропорционально емкости источника тока $\tau \approx \pi \sqrt{LC}$, то соотношение (1) преобразуется к виду

$$\pi \sqrt{LC} \frac{c_0}{S} \ll 1, \quad (2)$$

где L – индуктивность разрядного контура, Гн; C – емкость источника тока, Ф.

Левая часть соотношения (2) является безразмерным критерием возникновения области интенсивной кавитации в разрядной камере. Из соотношения (2) видно, что положение области определяется соотношением характерного размера камеры S и емкости источника тока. Следовательно, более эффективного управления механизмом электрогидроимпульсного измельчения можно достичь за счет обеспечения рационального соотношения указанных выше параметров, определяемого выражением (2). Наличие подвижной границы камеры позволяет за счет изменения ее параметров регулировать интенсивность кавитации.

Полученные результаты были положены в основу создания экспериментальной электрогидроимпульсной установки для тонкого и сверхтонкого измельчения порошковых материалов. Основные технические характеристики установки приведены в табл. 1. Конструкция разрядной камеры представляет собой вертикально расположенный цилиндр, закрытый сверху крышкой с загрузочной воронкой. Внизу на изоляционной основе расположена линейная электродная система с двойным межэлектродным промежутком.

Таблица 1

Основные технические характеристики установки для электрогидроимпульсного измельчения порошковых материалов

Параметр установки	Значение
Напряжение питания, В	220
Частота питающего напряжения, Гц	50
Напряжение заряда конденсаторов, кВ	40
Емкость конденсаторов, мкФ	1.8
Индуктивность, Гн	$1,0 \cdot 10^{-6}$
Объем разрядной камеры, л	1
Потребляемая мощность, кВт	0,374

На экспериментальной установке проводилось сверхтонкое измельчение порошка поликристаллического синтетического алмаза. Интегральная характеристика распределения частиц исходного порошка и продукта измельчения представлена на рис. 1.

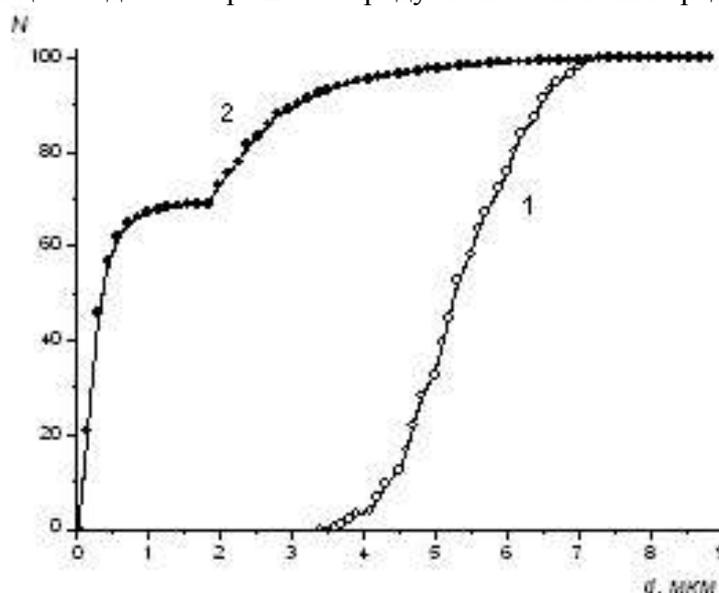


Рис. 1. Интегральная характеристика распределения частиц синтетического алмаза: 1 – в исходном материале; 2 – в продукте измельчения при воздействии разрядами в количестве $n=1000$.

Измельчение осуществлялось с целью получения максимального выхода частиц зернистости $-1+0$ мкм. Параметры процесса: соотношение твердой и жидкой фазы в обрабатываемой суспензии $T:Ж=1:10$, напряжение заряда $U=40$ кВ, емкость конденсаторов $C=1,8$ мкФ, индуктивность $L=1$ мкГн, объем камеры $V=1$ дм³, количество разрядов $n=1000$.

В табл. 2 приведены основные характеристики гранулометрического состава исходного порошка и продукта измельчения.

Таблица 2

Основные характеристики гранулометрического состава порошка поликристаллического синтетического алмаза

Параметр	Значение	
	Исходный материал	Продукт измельчения
Средний диаметр зерен, мкм	5,34	1,124
Стандартная ошибка	0,03	0,022
Медиана	5,22	0,338
Мода	4,73	1,910
Стандартное отклонение	0,80	1,423
Наибольший диаметр, мкм	7,30	8,979
Наименьший диаметр, мкм	3,40	0,010
Уровень надежности (95%)	0,05	0,043

Полученные данные свидетельствуют о том, что количество частиц размером менее 1 мкм, практически отсутствующих в исходном материале, в измельченном материале составило 67,25%. Количество энергии, затраченное на измельчение, составило 1,4 МДж.

Полученные результаты исследования позволяют заключить, что при обеспечении рациональных параметров электрогидроимпульсной установки получение субмикропорошков синтетического алмаза посредством разрядноимпульсной технологии является весьма перспективным. Для повышения эффективности тонкого и сверхтонкого измельчения порошков синтетического алмаза и других твердых материалов параметры

электрогидроимпульсной установки должны обеспечивать интенсивный кавитационный режим измельчения. В связи с этим выгодно отличается разрядная камера с подвижной границей.

Основные выводы:

1. Комплексный учет геометрических и электрических параметров электрогидроимпульсной установки является эффективным средством управления механизмом измельчения порошков твердых материалов.
2. При рациональном выборе указанных выше параметров электрогидроимпульсный способ является перспективным при получении субмикropорошков поликристаллического алмаза из микropорошков, трудно поддающихся измельчению классическими методами.

Литература.

1. Способ дробления сверхтвердых материалов / Бакуль В.Н., Никитин Ю.И., Уман С.М., Виноградов В.М., Лисица В.И., Несветайлов Г.А. // Электронная обработка материалов. – 1986. – №3. – С. 55 – 60.
2. Малюшевский П.П. О механизме тонкого измельчения материалов при электрическом взрыве в ограниченном объеме // Электронная обработка материалов. – 1982. – №3. – С. 58 – 63.
3. Виноградов Б.В., Федин Д.А., Никулин Д.С. Особенности гидродинамических процессов при импульсном электрическом разряде в ограниченном объеме жидкости // Вопросы химии и химической технологии. – 2004. - №2. – С.190-192.
4. Виноградов Б.В., Федин Д.А. О механизме сверхтонкого электрогидроимпульсного измельчения материалов // Сборник научных трудов НГУ. - 2004. - №19. - Т. 5. – С.115 - 119.
5. Виноградов Б.В., Федин Д.А. Управление динамикой процесса кавитации при импульсном электрическом разряде в ограниченном объеме жидкости // Сборник научных трудов НГУ. - 2005. - №12. - Т. 5. – С.49 - 51.
6. Федин Д.А. Исследование динамики кавитации при импульсном электрическом разряде в камере с упругим элементом// Вопросы химии и химической технологии. – 2005. - №4. – С.171-174.
7. Виноградов Б.В., Федин Д.А. Экспериментальное и теоретическое исследование тонкого электрогидроимпульсного измельчения материалов // Новые огнеупоры. – 2005. - №3. – С.41 – 43.
8. Шамко В.В. Развитие взрывных каверн в жестких оболочках // Электрогидравлический эффект и его применение. – Киев: Наукова думка, 1981. – С. 19 – 28.

УДК 66.022.5:621.926.086

Б.В. Виноградов, Д.А. Федин, В.И. Емельяненко, И.А. Осташко Об измельчении твердых остатков пиролиза изношенных автомобильных шин электрогидроимпульсным способом // Вопросы химии и химической технологии, 2008. - № 6.

Исследованы закономерности измельчения твердых остатков пиролиза изношенных автомобильных шин с использованием энергии высоковольтного импульсного электрического разряда в воде. Получены аналитические зависимости, описывающие кинетику измельчения.

Введение

Пиролиз является перспективным способом утилизации распространенного типа отходов – изношенных автомобильных шин. Помимо решения экологической проблемы данный способ позволяет вернуть в производственный цикл ценное сырье для производства резины – технический углерод. Однако твердый остаток пиролиза шин

представляет собой смесь частиц углерода широкого диапазона крупности с металлом и тяжелыми фракциями органических продуктов пиролиза. Кроме того, аморфная по своей структуре зола образует прочные агломераты размером от нескольких десятков микрон до нескольких миллиметров, в то время как высококачественный технический углерод должен иметь крупность частиц менее 1 мкм.

Измельчение остатков пиролиза до указанной крупности является сложной технической задачей. Традиционные современные ударно-истирающие аппараты недостаточно эффективны. Например, измельчением золы в вихревой мельнице удастся достигнуть продукта со средним диаметром частиц $d_{cp}=13,94$ мкм по весовому распределению и показателем адсорбции дибутилфталата (ДБФ) $N=64$, что недостаточно для современных требований к наполнителю резины. В связи с вышесказанным поиск альтернативных способов измельчения твердых остатков пиролиза изношенных автомобильных шин весьма актуален.

Перспективным способом тонкого и сверхтонкого измельчения материалов является электрогидроимпульсное (ЭГИ) измельчение, основанное на использовании явления высоковольтного импульсного электрического разряда (ВИЭР) в жидкости [1,2,3]. Отсутствие движущихся частей и мелящих тел обеспечивает значительно большую чистоту продукта измельчения по сравнению с ударно-истирающими аппаратами. Комплекс гидродинамических процессов, таких как ударные волны, высокоскоростные микроструи и кавитация позволяют производить измельчение твердых частиц до размера менее 1 мкм. Кроме того, кавитация и высокие импульсные давления являются мощными факторами воздействия на органическую составляющую твердого остатка, способствующими разложению тяжелых трудноудаляемых компонентов. Данная работа посвящена механическим аспектам измельчения твердых остатков.

Методика эксперимента и обсуждение результатов

Экспериментальные исследования процесса измельчения проводились с целью установления возможности получения продукта измельчения – технического углерода крупностью менее 1 мкм. Измельчению подвергался твердый остаток пиролиза, предварительно измельченный механическим способом до крупности менее 40 мкм и не измельченный остаток с размером частиц менее 2 мм. Анализ грансостава продукта измельчения и исходного материала осуществлялся методом прямого подсчета частиц с использованием оптической микроскопии и ситовым методом анализа в зависимости от диапазона крупности частиц в пробе. Интенсивность измельчения оценивалась по величине степени измельчения, представляющего собой отношение среднего расчетного диаметра частиц в исходном материале и продукте измельчения. Технологические свойства полученного технического углерода оценивались по величине адсорбции ДБФ согласно ГОСТ 25699.5 – 90.

Процесс измельчения осуществлялся в экспериментальной ЭГИ установке для тонкого и сверхтонкого измельчения порошков твердых материалов. Основными параметрами ВИЭР являются: напряжение разряда $U=35$ кВ, суммарная емкость конденсаторов $C=0,9$ мкФ. Энергия разрядного импульса рассчитывалась по формуле

$$W = \frac{U^2 C}{2}, \quad (1)$$

и составила 0,551 кДж. Технологический узел установки – вертикальная цилиндрическая разрядная камера объемом 1 л с нижним расположением электродной системы с двойным межэлектродным промежутком [3].

Методика эксперимента заключалась в следующем. В разрядную камеру помещалась суспензия измельчаемого материала с соотношением твердой и жидкой фазы (вода) Т:Ж=1:10. После обработки ВИЭР в количестве 10, 20, 30 и 50 производился отбор проб, сушка и анализ гранулометрического состава согласно методике, изложенной в работе [4]. Оценка удельной поверхности материала производилась по величине адсорбции ДБФ.

Основные результаты исследования процесса сверхтонкого измельчения твердых остатков крупностью менее 40 мкм приведены в табл. 1 и на рис. 1. В табл. 1 представлены результаты анализа гранулометрического состава материала в зависимости от длительности процесса измельчения. На рис. 1 приведена кривая зависимости процентного содержания частиц класса -1+0 мкм в зависимости от длительности процесса измельчения.

Таблица 1

Характеристики гранулометрического состава твердых остатков пиролиза изношенных шин в зависимости от длительности ЭГИ измельчения

Длительность измельчения, имп.	Средний диаметр частиц, мкм		Процентное содержание частиц класса -1+0 мкм, %		Адсорбция ДБФ
	по количеству	по массе	по количеству	по массе	
0	3,65	14,27	72	1	71
10	2,10	7,70	86	3	-
20	2,34	7,21	89	4,5	-
50	1,88	6,91	95	7,6	77

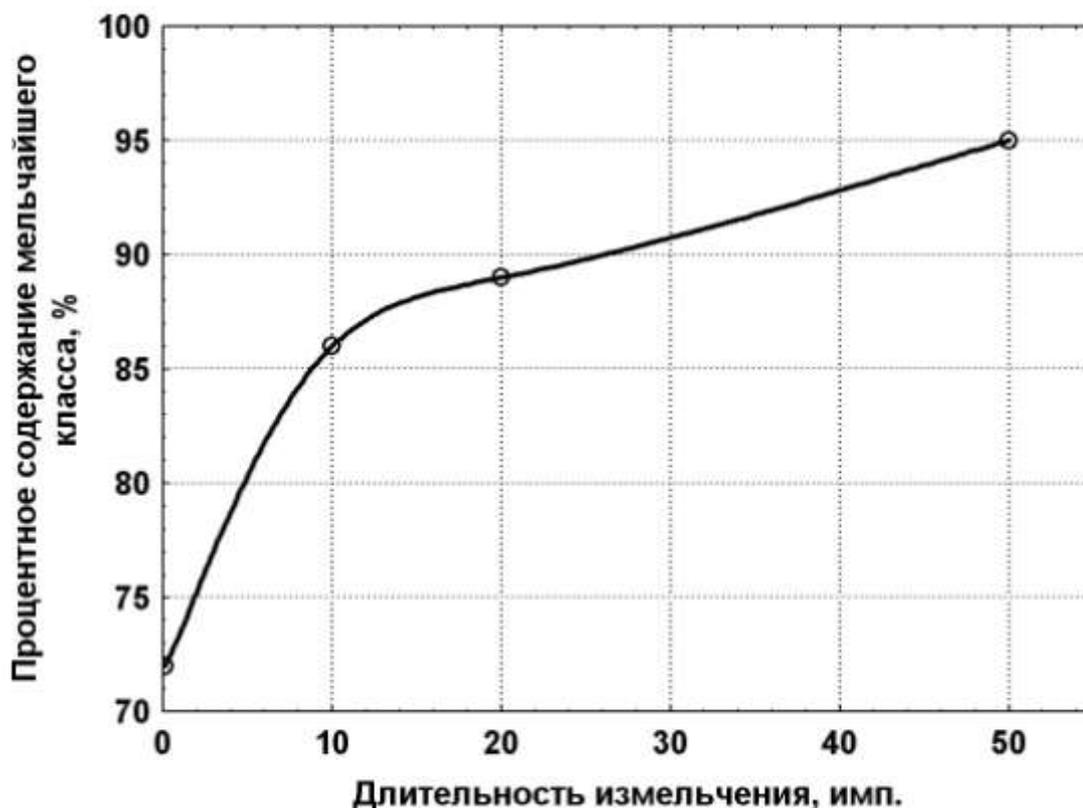


Рис. 1 Зависимость процентного содержания твердых частиц фракции -1+0 мкм (по количеству) от длительности измельчения.

Представленные результаты свидетельствуют о том, что наибольшая скорость измельчения имеет место первых десяти импульсах, что соответствует 5 с измельчения

при частоте следования импульсов $f=2$ Гц или 1 с измельчения при частоте следования импульсов $f=10$ Гц достижимых на современных ЭГИ установках. Средняя скорость увеличения количества частиц мельчайшего класса $-1+0$ мкм в данном промежутке времени составила 0,2 г/имп. (1,44 кг/ч). Далее скорость снижается и в промежутках 20 – 30 и 30 – 50 импульсов составила 0,15 г/имп. (1,08 кг/ч) и 0,1 г/имп. (0,72 кг/ч) соответственно. Прирост количества частиц класса $-1+0$ мкм при измельчении под действием 50 ВИЭР (25 с при частоте следования импульсов $f=2$ Гц) составил 23% по количеству частиц и 6,6% по весу, что составляет 6,6 г.

Причина снижения интенсивности процесса измельчения, по-видимому, заключается в уменьшении со временем крупного класса частиц $-40+1$ мкм, являющегося исходным классом. Согласно традиционным представлениям при механическом измельчении уменьшение количества крупного класса приводит к уменьшению скорости измельчения [4]. Кроме того, образование большого количества частиц мельчайшего класса (см. рис. 1) оказывает демпфирующее воздействие на ВИЭР. Для обеспечения достаточной для производственных нужд производительности ЭГИ установки необходимо организовать замкнутый цикл измельчения с сепарацией мельчайшего класса.

Таблица 2

Характеристики гранулометрического состава твердых остатков пиролиза изношенных шин в зависимости от длительности ЭГИ измельчения

Длительность измельчения, имп.	Вес фракции, г				Средний диаметр частиц, мкм
	-200+110 мкм	-110+80 мкм	-80+40 мкм	-40+0 мкм	
0	97,60	19,90	16,70	3,20	128,7
10	85,20	16,80	21,70	4,90	123,9
20	77,20	16,70	21,20	6,10	120,4
30	75,70	15,16	15,76	8,50	119,4
50	72,40	15,16	15,76	9,75	118,9

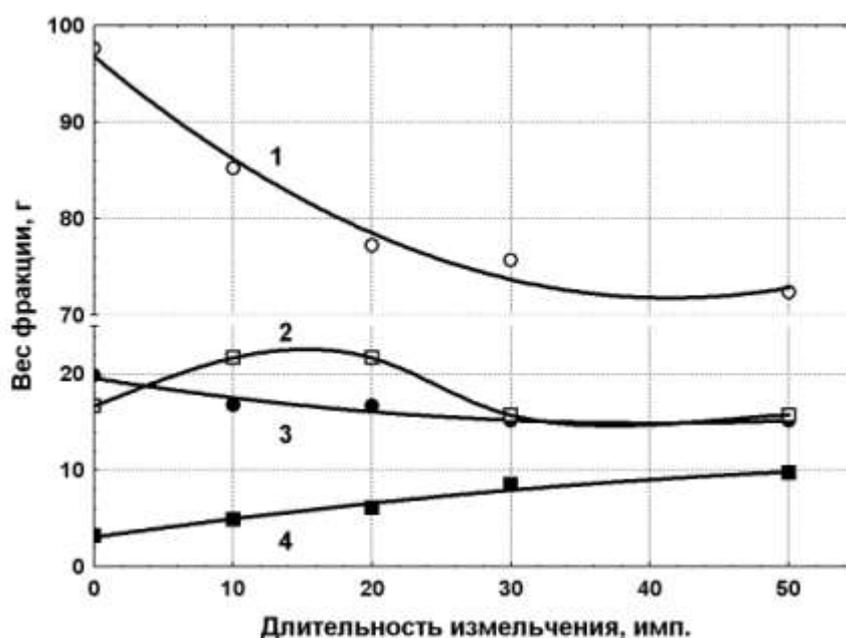


Рис. 2 Изменение массы частиц твердого остатка пиролиза изношенных шин по фракциям в зависимости от длительности измельчения: 1 – $-200+110$ мкм; 2 – $-110+80$ мкм; 3 – $-80+40$ мкм; 4 – $-40+0$ мкм.

Полученные результаты позволяют сказать, что ЭГИ является перспективным способом сверхтонкого измельчения твердых остатков пиролиза изношенных шин. Однако для увеличения производительности аппарата и уменьшения энергоемкости процесса необходимо организовать замкнутый цикл измельчения с сепарацией.

Для установления влияния гранулометрического состава питания установки на эффективность измельчения проведены экспериментальные исследования процесса ЭГИ измельчения твердых остатков пиролиза изношенных шин широкого диапазона крупности. Для имитации замкнутого цикла измельчения с сепарацией после каждого этапа измельчения мельчайший класс $-40+0$ мкм удалялся из разрядной камеры. В таблице 2 приведены результаты анализа гранулометрического состава частиц в зависимости от времени измельчения. На рис. 2 приведены кривые кинетики измельчения твердых частиц для каждого класса крупности.

Для математического описания кинетики измельчения воспользуемся приемом, представленным в работе [5] для описания кинетики последовательных химических реакций.

Представим, что крупный класс А ($-200+80$ мкм) превращается в класс В ($-80+40$ мкм), а последний образует класс С ($-40+0$ мкм). Данное представление справедливо, если пренебречь обратным переходом частиц в более крупные классы в результате агрегатизации и прямым переходом частиц из крупного класса в мельчайший минуя промежуточный класс. Тогда скорость исчезновения класса А можно представить в виде [5]

$$-v_A = k_1 R_A, \quad (2)$$

где v_A - скорость изменения количества класса А; k_1 - константа, характеризующая интенсивность процесса перехода частиц из класса А в класс В; R_A - количество класса А.

Скорость появления класса В и С можно представить в виде

$$v_B = k_1 R_A - k_2 R_B, \quad (3)$$

$$v_C = k_2 R_B. \quad (4)$$

Если пренебречь потерями, то выполняется условие

$$v_A + v_B + v_C = 0.$$

Зависимость количества крупного класса от времени можно получить путем интегрирования уравнения (2) в виде [5]

$$R_A = R_{A0} e^{-k_1 t}, \quad (5)$$

где R_{A0} - количество крупного класса в начальный момент времени.

Зависимость количества среднего и мельчайшего класса получим в виде [5]

$$R_B = R_{A0} \frac{k_1}{k_2 - k_1} (e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t}), \quad (6)$$

$$R_C = R_{A0} \left(1 - \frac{k_2 e^{-k_1 t} - k_1 e^{-k_2 t}}{k_2 - k_1} \right). \quad (7)$$

Математическое описание более сложной схемы значительно усложняется. В частности количество классов В и С в начальный момент времени отлично от нуля, что приводит к некоторому сдвигу начала отсчета для экспериментальных кривых по времени. Константы k_1 и k_2 , входящие в уравнения (3) – (7), определяются путем нелинейного оценивания экспериментальных зависимостей. Математический анализ полученных зависимостей позволяет сделать более обоснованные выводы о закономерностях кинетики измельчения классов, так как открывают взаимосвязь между скоростями измельчения и количеством классов частиц.

Для установления адекватности модели, описываемой уравнениями (2) – (4), процессу ЭГИ измельчения по экспериментальным данным произведен расчет скорости измельчения классов -200+80 мкм (класс А), -80+40 мкм (класс В) и -40+0 мкм (класс С) в различные моменты времени, а также линейное оценивание зависимостей (2-4). Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Табл. 3

Результаты линейного оценивания зависимости скоростей измельчения классов частиц

Длительность измель-чения	Данные и результаты линейного оценивания												
	Класс А					Класс В					Класс С		
	k_1	А	$v_{\text{Э}}$	v_A	$ v_{\text{Э}} - \hat{v}_A $	k_2	В	$v_{\text{Э}}$	\hat{v}_B	$ v_{\text{Э}} - \hat{v}_B $	$v_{\text{Э}}$	\hat{v}_C	$ v_{\text{Э}} - \hat{v}_C $
10	0,1	102	-	-	0,02	0,01	21,7	0,5	0,23	0,22	0,2	0,23	0,03
20		93,9	-	-	0,09		21,2	-	-	0,07	0,25	0,33	0,08
30		90,9	-	-	0,11		15,8	-	-	0,45	0,24	0,25	0,01
50		87,6	-	-	0,09		15,8	0	-	0,23	0,06	0,25	0,19

Количество крупного класса R_A экспоненциально уменьшается со временем в соответствии с уравнением (5). Это свидетельствует о том, что основные закономерности кинетики измельчения, установленные для механического измельчения, сохраняются и в случае ЭГИ измельчения: скорость измельчения крупного класса уменьшается с уменьшением его количества. Количество класса R_B растет проходя через максимум и снова падает стремясь к нулю, так как в конце концов класс В переходит в класс С. Количество мельчайшего класса С растет со временем. Теоретически, кривая, описывающая рост количества класса С, должна изменить знак кривизны и асимптотически стремиться к максимальному значению. В рассматриваемом промежутке времени значительного изменения хода кривой 4 (см. рис. 2) не происходит. Это говорит о том, что предел измельчения не достигнут. Однако, как показано выше, интенсивность измельчения крупных классов значительно снизилась.

Согласно уравнению (2) скорость измельчения крупного класса А уменьшается со временем, что и наблюдается в опыте (см. табл.3). Знак минус в значении скорости свидетельствует об уменьшении количества класса. Абсолютная скорость измельчения промежуточного класса В представляет собой сумму относительных скоростей измельчения класса А и класса В. Нелинейное оценивание показало, что константа скорости измельчения класса А k_1 на порядок больше k_2 . Следовательно, измельчение промежуточного класса В протекает на порядок менее интенсивно, чем измельчение класса А. Значительно большее количество затраченной энергии расходуется на образование промежуточного класса, чем на образование целевого мельчайшего класса.

Кроме того, анализ выражения (4) говорит о том, что скорость образования мельчайшего класса пропорциональна количеству промежуточного класса. Так как кривая измельчения промежуточного класса прошла через экстремум, максимальная скорость образования мельчайшего класса достигнута и со временем будет только уменьшаться.

Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Получены аналитические зависимости, описывающие кинетику тонкого и сверхтонкого ЭГИ измельчения твердых остатков пиролиза изношенных автомобильных шин.

2. Установлено, что наибольшая скорость измельчения наблюдается в течение первых десяти импульсов воздействия, что указывает на необходимость организации непрерывного процесса измельчения с сепарацией мельчайших классов и возвратом крупных частиц в разрядную камеру для обеспечения постоянства гранулометрического состава питания.

3. Показано, что ЭГИ способ сверхтонкого измельчения твердых остатков пиролиза изношенных автомобильных шин может рассматриваться как один из альтернативных способов получения технического углерода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малюшевский П.П. О механизме тонкого измельчения материалов при электрическом взрыве в ограниченном объеме // Электронная обработка материалов. – 1982. – №3. – С. 58–63.

2. Виноградов Б.В., Федин Д.А. О механизме сверхтонкого электрогидроимпульсного измельчения материалов // Сборник научных трудов НГУ. – 2004. – Т.5, №19 – С.115–119.

3. Виноградов Б.В., Федин Д.А., Емельяненко В.И. Эффективность измельчения порошков в составной электроразрядной камере с упругими элементами // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тематичний випуск «Хімія, хімічна технологія та екологія»: Зб. наук. праць. – Харків: Вид. НТУ «ХПІ», 2005. – №51. – С. 99–105.

4. Андреев С.Е., Товаров В.В, Перов В.А. Закономерности измельчения и исчисление характеристик гранулометрического состава. – М: Металлургиздат, 1959. – 437 с.

5. К. Лейдлер. Кинетика органических реакций: Пер. с англ. – М.: Мир, 1966. – 349 с.