

УДК 628.544

**В. И. Романовский**, кандидат технических наук, ассистент (БГТУ);**О. А. Петров**, кандидат технических наук, доцент (БГТУ)**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СПОСОБОВ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ  
ОТРАБОТАННЫХ СИНТЕТИЧЕСКИХ ИОНИТОВ**

Представлены результаты сравнительного анализа аппаратов, применяемых для диспергирования материалов в промышленности, и оценки их эффективности при диспергировании отработанных ионитов с целью получения сорбционных материалов. В качестве сравнительных характеристик выбраны удельные энергозатраты на измельчение грамма материала, к.п.д. установок и характеристики получаемых материалов: полная статическая обменная емкость, медианный диаметр частиц, абсолютное значение дзета-потенциала для частиц размером менее 5 мкм.

Results of the comparative analysis of the devices applied for dispergation of materials in the industry, and estimations of their efficiency are presented at dispergation used-up ionites for the purpose of reception sorbtion materials. As comparative characteristics specific power inputs on crushing of gramme of a material, efficiency are chosen. Installations and the characteristic of received materials: full static exchange capacity, median diameter of particles, absolute value of dzeta-potential for particles in the size less than 5 microns.

**Введение.** Значительную долю в отходах производства и потребления занимают утраченные потребительские свойства материалы, амортизированные изделия, содержащие синтетические полимеры, относящиеся к термопластичным материалам. Подготовка таких отходов к использованию обязательно включает стадию измельчения, целью которой является получение материала в виде частиц определенной формы и размеров, что позволяет их перерабатывать по хорошо отработанным на практике технологиям при определенных температуре и давлении.

Большинство исследований и реализованных на практике технологий переработки отходов полимеров относятся к термопластичным материалам. В то же время для отходов, содержащих сетчатые полимеры, переработка в материалы и изделия методами, отработанными применительно к термопластам, невозможна. К отходам, технологии переработки которых не разработаны, относятся отработанные синтетические ионообменные материалы.

Отработанные синтетические иониты до настоящего времени не рассматривались в качестве вторичного сырья. Однако такие свойства отработанных ионитов, как достаточно высокая остаточная сорбционная емкость, идентичность химического состава составу водорастворимых полиэлектролитов, которые являются эффективными флокулянтами, и др., свидетельствуют о перспективности их использования для получения различных продуктов.

Объектом исследования были отработанные синтетические иониты КУ-2-8 и АВ-17-8.

Как уже отмечалось, отработанные синтетические иониты близки по составу и свойствам применяемым в настоящее время флокулянтам и характеризуются весьма значитель-

ной остаточной обменной емкостью. В связи с этим интерес представляет получение на основе отработанных ионитов материалов, пригодных для использования в технологии очистки сточных вод в качестве сорбентов и коагулянтов. Как один из способов получения таких материалов может рассматриваться измельчение [1]. Выбор условий измельчения, обеспечивающих получение продукта с заданными свойствами, проводили по результатам пробного коагулирования контроля сорбционной емкости, дзета-потенциала, распределения функциональных групп [1].

**Выбор установок для диспергирования отработанных ионитов.** Выбор механохимического метода переработки отработанных синтетических ионитов будет определяться в основном характеристиками исходного материала и требованиями к качеству продукта. Для помола в промышленности применяют молотковые, роторные, барабанные, вибрационные мельницы и др. Наибольшее распространение в промышленности для тонкого помола и активации нашли планетарные мельницы [2]. Их использование рационально для получения материала с размерами более 20 мкм, поскольку для получения частиц меньшего размера существенно увеличиваются затраты энергии. Для дальнейшего уменьшения размеров частиц можно использовать кавитационное воздействие. В настоящее время такую обработку можно осуществлять в ультразвуковых и суперкавитирующих аппаратах.

Применение ультразвуковой обработки и суперкавитирующих аппаратов для диспергирования водных суспензий отработанных ионообменных смол может быть перспективно для получения более мелкодисперсного материала (например, для получения коагулянта степень

измельчения должна быть близкой к дисперсным частицам гидроксокомплексов, образующихся при гидратации коагулянтов). Применение ультразвуковых и суперкавитирующих аппаратов позволит снизить влияние повышенной температуры (которая сильно заметна при сухой обработке в планетарной мельнице) на количество функциональных групп.

Кроме других достоинств, применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности обеспечивает 10–1000-кратное ускорение процессов, протекающих между двумя или несколькими неоднородными средами (растворение, очистка, измельчение, эмульгирование, гомогенизация, химические и электрохимические реакции и др.). При этом увеличивается выход полезных продуктов и им придаются дополнительные свойства (например, биологическая активность и стерильность), а также удается получить вещества с новыми свойствами (например, тонкодисперсные эмульсии и суспензии).

Применение ультразвуковых установок основано на принципе кавитации. Кавитация – образование в жидкости пульсирующих пузырьков (каверн, полостей), заполненных паром, газом или их смесью. Под действием ультразвуковой волны во время полупериодов разрежения в жидкости возникают кавитационные пузырьки, которые резко захлопываются после перехода в область повышенного давления, порождая сильные гидродинамические возмущения в жидкости, интенсивное излучение акустических волн. При этом в жидкости происходит разрушение поверхностей твердых тел, граничащих с кавитирующей жидкостью. Ниже представлена классификация ультразвуковых излучателей.

1. Аэродинамические преобразователи обеспечивают преобразование энергии потока газа в ультразвуковые колебания газовой среды. По характеру преобразования энергии потока газа аэродинамические преобразователи делятся:

- а) на статические сирены или газоструйные излучатели;
- б) динамические сирены.

2. Гидродинамические излучатели обеспечивают преобразование энергии струи жидкости в энергию ультразвуковых колебаний. Их действие основано на генерировании ультразвуковых колебаний в жидкой среде при взаимодействии вытекающей из сопла струи с препятствием определенной формы и размеров либо при принудительном периодическом прерывании струи. Действие газоструйных излучателей основано на вихреобразовании, резонансе, автоколебаниях и других физических эффектах. В зависимости от характера преобра-

зования энергии гидродинамические излучатели делятся:

- а) на пластинчатые излучатели;
- б) клапанные;
- в) вихревые;
- г) пульсационные;
- д) роторные.

Рабочие частоты гидродинамических излучателей не превышают 20 кГц.

3. Электромеханические преобразователи – низкочастотные вибраторы, обеспечивающие воздействие с большой амплитудой на объекты большой массы. Электромеханические преобразователи делятся:

- 1) на электромагнитные, с подвижным железным якорем, основанные на преобразовании энергии электрического тока в магнитном поле;
- 2) электродинамические излучатели, основанные на преобразовании энергии электрического тока в магнитном поле;
- 3) механические вибраторы – основаны на преобразовании механической энергии одного вида (энергии вращения кривошипно-шатунных механизмов) в продольные колебания.

4. Импульсные источники. Действие таких источников основано на преобразовании различных видов энергии для создания коротких широкополосных сигналов. Различаются:

- 1) взрывные – обеспечивающие преобразование энергии взрыва в звуковые колебания;
- 2) ударные – преобразующие энергию механического удара;
- 3) тепловые – основанные на тепловом ударе;
- 4) электроразрядные – преобразующие энергию электрического разряда в жидкости;
- 5) импульсные электродинамические.

5. Магнитострикционные преобразователи – обеспечивают преобразование энергии магнитного поля в механические колебания ультразвуковой частоты.

6. Пьезоэлектрические преобразователи – обеспечивают преобразование энергии электрического поля в механические колебания ультразвуковой частоты.

Среди перечисленных ультразвуковых излучателей наибольшим к.п.д. обладает пьезоэлектрический (>50%).

Наряду с ультразвуковыми установками перспективными являются гидродинамические суперкавитирующие аппараты, принцип работы которых сводится к следующему. При резком понижении давления из-за появления больших местных скоростей в потоке жидкости (гидродинамическая кавитация) в капельной жидкости образуются полости (разрывы сплошности), заполненные газом, паром или их смесью, при схлопывании которых (микровзрывах) образуются ударные волны и направленные (кумуля-

тивные) микроструи: например, при сужении поперечного сечения трубопровода с последующим расширением или при обтекании потоком жидкости разнообразных препятствий (конусы, сферы, пластины и т. д.). В последнем случае за обтекателем образуется полость больших размеров – сверх- или суперкаверна, по периферии которой, в основном в хвостовой части, образуется поле коллапсирующих кавитационных пузырьков.

В целом, суперкавитирующие гидродинамические устройства по принципу работы разделяются: на статические – с неподвижными рабочими органами; динамические – с вращающимися рабочими органами; струйные – со струйными кавитаторами; комбинированные – состоящие из различных комбинаций первых трех типов. Рабочие органы таких аппаратов часто устанавливаются на специально спрофилированных проточных участках (наподобие сопел Вентури, Лаваля и др.).

Анализируя представленную выше информацию, в лабораторных исследованиях использовали планетарную шаровую мельницу, ультразвуковую установку с пьезоэлектрическим излучателем и статический суперкавитатор.

Планетарная шаровая мельница (рис. 1): мощность – 250 Вт, к.п.д. – 73%, частота – 1375 об./мин, внутренний диаметр загрузочных барабанов – 47 мм, диаметр мелющих тел (металлические шарики) – 7–9 мм, количество шариков в барабане – 40 шт., объем загрузки ионита – 25 см<sup>3</sup> на один барабан.



Рис. 1. Планетарная шаровая мельница

В планетарной мельнице имеется два барабана, вращающихся вокруг центральной оси и одновременно вокруг собственных осей в противоположном направлении. В барабаны загружают измельчаемый материал и мелющие тела (металлические шарики). Частицы измельчаемого материала претерпевают множество контактов с мелющими телами, стенками барабана и между собой. Измельчение здесь проис-

ходит преимущественно за счет раздавливания и истирания. Центробежный фактор, определяющий эффективность измельчения, в лабораторных планетарных мельницах может достигать 30g.

Ультразвуковая установка с пьезоэлектрическим излучателем производства фирмы «ИНЛАБ» (Россия) ИЛ 100-6/1 (рис. 2): мощность установки – 630 Вт, рабочая частота – (22 ± 10%) кГц, амплитуда колебаний – не менее 40 мкм, объем обрабатываемой суспензии – 200 мл.

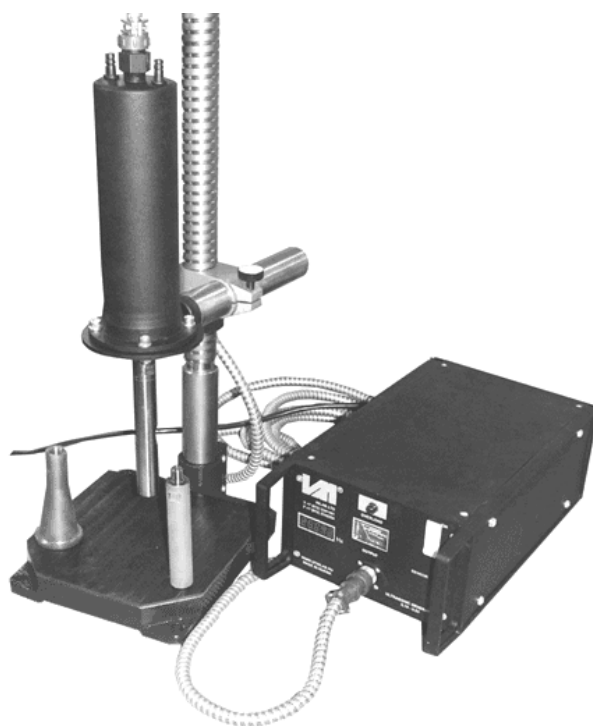


Рис. 2. Ультразвуковая установка с пьезоэлектрическим излучателем

Принцип работы ультразвуковой установки основан на явлении кавитации. При распространении ультразвуковых волн в жидкости образуется множество микропузырьков, которые при захлопывании производят большие гидравлические удары, способные разрушать загрязнения и отрывать их от поверхности очищаемого изделия.

Статическая суперкавитирующая установка (рис. 3): сопротивление кавитатора  $\Delta P = 20$  кПа, насос – X50-32-125 (подача – 12,5 м<sup>3</sup>/ч, напор – 20 м), электродвигатель (мощность – 1,5 кВт, частота 3000 об./мин), объем обрабатываемой суспензии – 0,016 м<sup>3</sup>.

Экспериментальная гидродинамическая суперкавитирующая установка представляет собой замкнутый циркуляционный контур. Она состоит из емкости 1, из которой при помощи центробежного насоса 2 жидкость нагне-

тается из всасывающего участка трубопровода 3. В горизонтальный участок нагнетательного трубопровода 4 монтируются кавитаторы 5 в виде отдельных вставок. Кавитатор представлял собой сопло, в диффузор которого устанавливается конический обтекатель специальной конфигурации. Конструкция создавалась на основании ранее разработанных математических моделей и опыта эксплуатации подобных аппаратов [3].

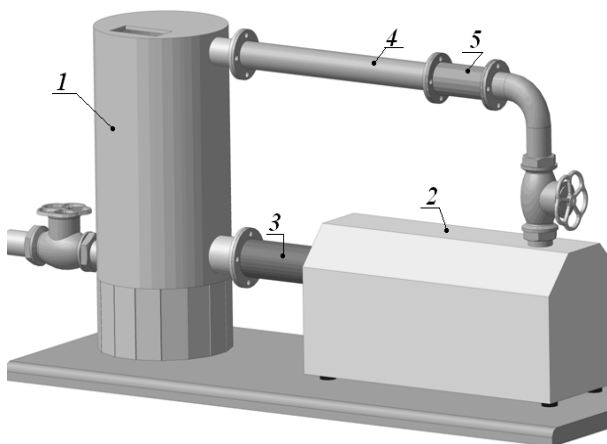


Рис. 3. Статическая суперкавитирующая установка:  
1 – емкость; 2 – центробежный насос;  
3 – всасывающий участок трубопровода;  
4 – нагнетательный участок трубопровода;  
5 – кавитатор

Одно из основных преимуществ таких устройств заключается в том, что при определен-

ных условиях можно создать режим, когда вся энергия кавитационного воздействия направляется непосредственно на разрушение обрабатываемого материала без эрозии рабочих поверхностей оборудования. Далее жидкость возвращается в емкость 1. Цикл повторяется определенное количество раз.

Установка была оснащена приборами для регулирования, контроля и измерения всех необходимых параметров.

**Результаты исследований.** Для сравнительного анализа выбранных способов диспергирования отработанных синтетических ионитов использовались следующие показатели: удельные энергозатраты на измельчение грамма материала (для расчета энергозатрат использовалось заявленное по паспортам энергопотребление используемых установок), к.п.д. установок и характеристики получаемых материалов (полная статическая обменная емкость (ПСОЕ) и медианный диаметр частиц,  $d_m$ , абсолютное значение дзета-потенциала для частиц размером менее 5 мкм  $\xi$ ) после 5 мин обработки. Для обработки отработанных синтетических ионитов в ультразвуковой установке с пьезоэлектрическим излучателем требуется предварительное измельчение материала до размеров частиц менее 200 мкм (проводимое в планетарной мельнице в течение 2 мин). Характеристика используемых аппаратов и получаемого материала представлена в табл. 1, а удельные энергозатраты – на рис. 4.

Достоинства и недостатки используемых аппаратов указаны в табл. 2.

Таблица 1

Характеристика используемых аппаратов и получаемого материала

Тип аппарата	Технические параметры аппаратов	К.п.д.	Характеристика получаемого материала (анионит/катионит)
1. Планетарная мельница	Периодическое действие, стесненный высокоскоростной удар, истирание. Теоретическая скорость шаров от 18–45 м/с	<8%	ПСОЕ – 1150 мг/г $d_m$ – 46 мкм $\xi$ – 27,1 мВ
			ПСОЕ – 450 мг/г $d_m$ – 33 мкм $\xi$ – 36,1 мВ
2. Гидродинамическая суперкавитирующая установка	Время пребывания сырья в рабочей зоне аппаратов меньше 1 с. Кавитация. Скорость жидкости в местном сопротивлении до 20 м/с при напоре – 200 кПа	<10%	ПСОЕ – 1350 мг/г $d_m$ – 62 мкм $\xi$ – 24,8 мВ
			ПСОЕ – 520 мг/г $d_m$ – 47 мкм $\xi$ – 17,4 мВ
3. Ультразвуковая установка с пьезоэлектрическим излучателем	Периодическое действие. Кавитация. Частота колебаний ( $22 \pm 10\%$ ) кГц	>50%	ПСОЕ – 1500 мг/г $d_m$ – 12 мкм $\xi$ – 19,3 мВ
			ПСОЕ – 600 мг/г $d_m$ – 9 мкм $\xi$ – 15,9 мВ

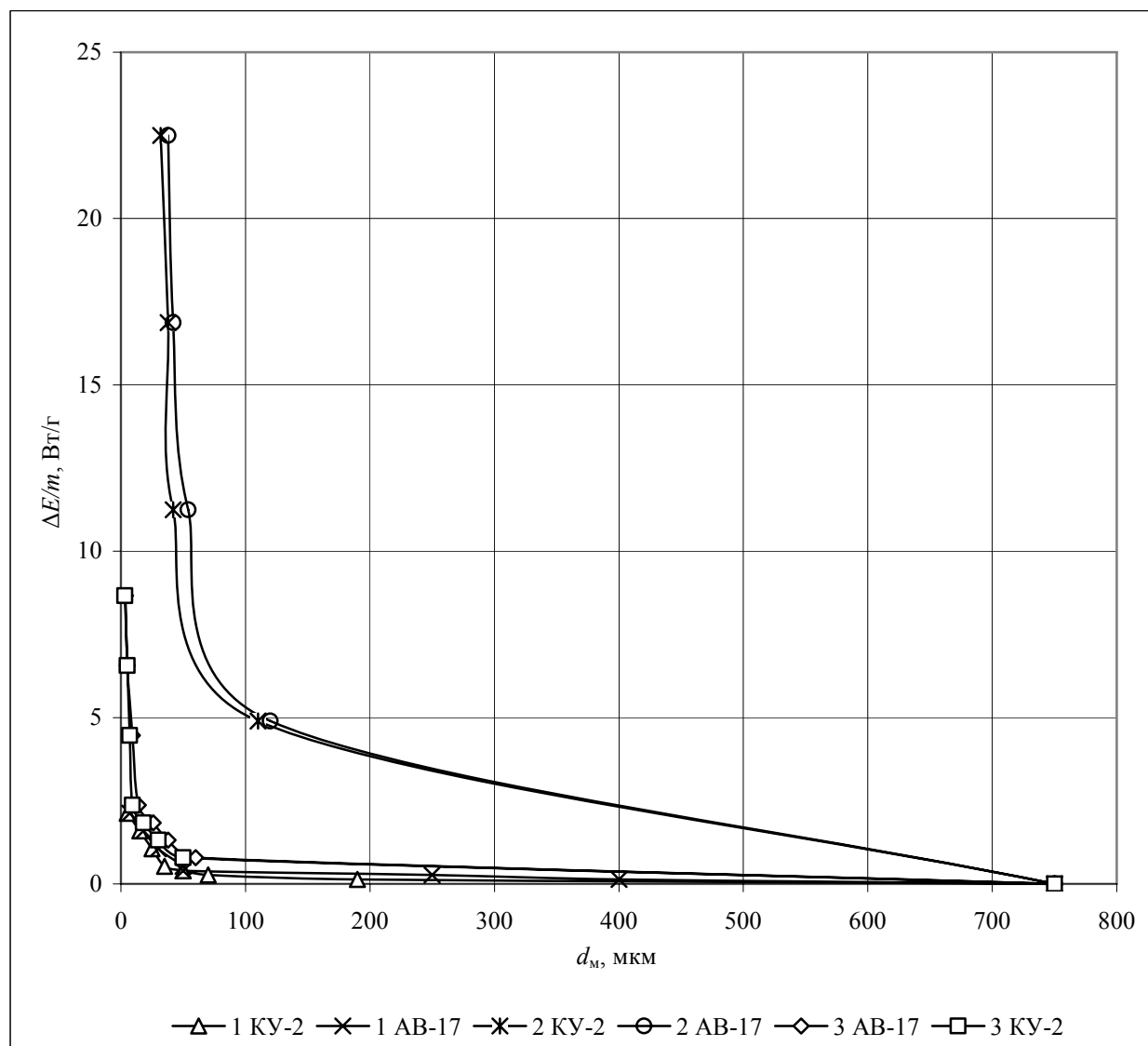


Рис. 4. Удельные энергозатраты на диспергирование материала

Таблица 2

## Достоинства и недостатки используемых аппаратов

Тип аппарата	Достоинства	Недостатки
1. Планетарная мельница	Активация материала. Возможность работать в режиме самоизмельчения, без загрузки мелющих тел	Разогрев материала либо помол в жидкой среде. Проблемы с масштабированием. Периодическая работа. Намол мелющих тел. Низкий к.п.д.
2. Гидродинамическая суперкавитирующая установка	Низкие капитальные затраты. Простота конструкции. Отсутствие разрушения рабочих поверхностей. Возможность регулирования параметров процесса	Низкий к.п.д. Периодичность (циклического действия)
3. Ультразвуковая установка с пьезоэлектрическим излучателем	Относительно высокий к.п.д. Отсутствие разрушения рабочих поверхностей. Возможность регулирования параметров процесса	Влияние ультразвука на организм человека при больших мощностях. Периодическая работа

Медианный диаметр частиц ионитов при измельчении закономерно уменьшается с увеличением продолжительности обработки. Зависимость медианного диаметра ( $d_m$ , мкм) частиц от удельных энергозатрат на измельчение отработанных ионитов ( $\Delta E/m$ , Вт/г) описывается формулой

$$\Delta E/m = k \cdot d_m^{-a},$$

где  $k$  и  $a$  – коэффициент и показатель степени.

Зависимости медианного диаметра частиц от удельных энергозатрат при измельчении в планетарной мельнице описываются следующими формулами:

$$\text{АВ-17: } \Delta E/m = 3,4821 \cdot d_m^{-0,3923};$$

$$\text{КУ-2: } \Delta E/m = 3,2252 \cdot d_m^{-0,4114}.$$

Зависимости медианного диаметра частиц от удельных энергозатрат при измельчении в планетарной мельнице в течение 4 мин и последующей обработкой в ультразвуковой установке с пьезоэлектрическим излучателем имеют вид:

$$\text{АВ-17: } \Delta E/m = 1,9174 \cdot d_m^{-0,3414};$$

$$\text{КУ-2: } \Delta E/m = 1,6943 \cdot d_m^{-0,3232}.$$

Зависимости медианного диаметра частиц от удельных энергозатрат при измельчении в гидродинамической суперкавитирующей установке описываются как:

$$\text{АВ-17: } \Delta E/m = 1,0178 \cdot d_m^{-0,192};$$

$$\text{КУ-2: } \Delta E/m = 0,913 \cdot d_m^{-0,174}.$$

Капитальные затраты на покупку оборудования для измельчения 300 т/год отработанных ионитов составят: покупка планетарной мельницы – 15 000 дол. США, ультразвуковой установки – 15 000 дол. США, гидродинамической суперкавитирующей установки – менее 1500 дол. США.

**Выводы и рекомендации.** Из представленных материалов и сравнительных характеристик различных способов диспергирования отработанных синтетических ионитов можно предложить следующие варианты схем:

– обработка в планетарной мельнице в течение 2 мин и последующая обработка в ультразвуковой установке с пьезоэлектрическим излучателем. Данная комплексная обработка будет обладать следующими недостатками: двухстадийность, относительно высокие капитальные затраты; однако позволит получать требуемый высокодисперсный материал при небольших энергозатратах;

– одностадийная обработка в статической суперкавитирующей установке. Данная обработка будет обладать следующими недостатками: относительно высокие энергозатраты в сравнении с предыдущим вариантом; для достижения требуемой степени дисперсности необходим возврат крупной фракции (>20 мкм) на повторную обработку. Достоинство данной установки – невысокие капитальные вложения.

Оценку коагулирующей способности измельченных ионитов проводили на сточных водах Брестского чулочного комбината (БЧК), Бобруйской трикотажной фабрики (БТФ), сточных водах производства ДВП и др.

При очистке сточных вод от красителей уже через 5 мин достигается степень очистки до 60%. Через 1 ч степень очистки достигает 95%.

Степень очистки сточных вод БТФ от красителей составила до 9%. Используемые сточные воды: красильная ванна после активного крашения (состав: соль поваренная, сода кальцинированная, красители: активный глубоко черный СТ); красильная ванна, крашение прямыми красителями (состав: соль – 10%, сода – 2%, красители: прямой синий светопрочный КУ, прямой черный С).

Степень очистки производственных сточных вод БЧК составила до 90%.

Показано, что отработанные иониты могут найти применение для разделения смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ).

Результаты исследований свидетельствуют о том, что измельченные отработанные иониты представляют собой перспективный материал для использования в процессах очистки сточных вод и обработки отходов.

### Литература

1. Романовский, В. И. Влияние механохимической активации отходов ионитов на дисперсный состав и свойства получаемых продуктов / В. И. Романовский, В. Н. Марцуль // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2008. – № 2. – С. 111–117.
2. Аввакумов, Е. Г. Механические методы активации химических процессов / Е. Г. Аввакумов; под ред. А. С. Колосова. – Новосибирск: Наука, 1986. – 306 с.
3. Петров, О. А. Математическая модель расчета параметров каверны / О. А. Петров, П. Е. Вайтехович // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхніч. навук. – 2004. – № 2. – С. 35–37.

Поступила 25.02.2011