

УДК 622.765.4

А. А. Ковалева, П. С. Кулевец, А. Э. Левданский
Белорусский государственный технологический университет

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОЦЕСС ФЛОТАЦИОННОГО
РАЗДЕЛЕНИЯ СМЕСИ ПОЛИБУТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА
И АКРИЛОНИТРИЛБУТАДИЕНСТИРОЛА**

Статья посвящена изучению влияния различных факторов на процесс флотационного разделения смеси полибутилентерефталата (ПБТ) и акрилонитрилбутадиенстирола (АБС) методом пенной флотации. Исследования проводились на лабораторной флотационной установке колонного типа с пневматической аэрацией. Выполнен анализ влияния рабочих параметров, таких как концентрация поверхностно-активных веществ (ПАВ), температура рабочего раствора, расход воздуха, высота столба рабочего раствора, а также соотношение ПБТ : АБС в исходной смеси, на эффективность процесса флотации. По результатам экспериментов построены зависимости, позволяющие установить оптимальные диапазоны параметров процесса флотации смеси измельченных пластмасс для достижения высокой эффективности разделения. Полученные результаты могут быть использованы для разработки более эффективных технологий флотационного разделения пластмасс.

Ключевые слова: пенная флотация, фактор, пластик, отход, поверхностно-активное вещество, концентрация, температура, расход воздуха, высота столба рабочего раствора.

Для цитирования: Ковалева А. А., Кулевец П. С., Левданский А. Э. Исследование факторов, влияющих на процесс флотационного разделения смеси полибутилентерефталата и акрилонитрилбутадиенстирола // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2023. № 2 (271). С. 35–41. DOI: 10.52065/2520-2669-2023-271-2-5.

A. A. Kovaleva, P. S. Kulevets, A. E. Levdanski
Belarusian State Technological University

**STUDY OF FACTORS AFFECTING THE PROCESS OF FLOTATION
SEPARATION OF POLYBUTYLENE TEREPHTHALATE AND ACRYLONITRILE
BUTADIENE STYRENE MIXTURE**

The study is devoted to the influence of various factors on the process of flotation separation of polybutylene terephthalate (PBT) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS) mixture by froth flotation. Researches were carried out on the laboratory flotation installation of column type with pneumatic aeration. An analysis of influence of working parameters, such as concentration of surface-active substances, temperature of working solution, air consumption, height of working solution column, and ratio PBT : ABS in the initial mixture on efficiency of flotation process was carried out. Based on the results of the experiments the dependencies were built, which made it possible to determine the optimal ranges of flotation process parameters for a mixture of crushed plastics in order to achieve high separation efficiency. The obtained results can be used for development of more effective technologies of flotation separation of plastics.

Keywords: froth flotation, factor, plastic, waste, surfactant, concentration, temperature, air flow rate, working solution column height.

For citation: Kovaleva A. A., Kulevets P. S., Levdanski A. E. Study of factors affecting the process of flotation separation of polybutylene terephthalate and acrylonitrile butadiene styrene mixture. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2023, no. 2 (271), pp. 35–41. DOI: 10.52065/2520-2669-2023-271-2-5 (In Russian).

Введение. Обращение с пластиковыми отходами становится важной проблемой из-за их воздействия на окружающую среду и здоровье человека [1]. Это связано с тем, что для разложения пластиковых отходов требуется сотни лет, что приводит к их накоплению в окружающей среде. Со временем под воздействием окружающей среды пластиковые отходы распадаются на

мелкие частицы (микропластик) и могут попадать в организм человека и животных, нанося вред их здоровью. Поэтому переработка данного вида отходов является важным шагом в снижении его воздействия на окружающую среду и здоровье человека [2, 3]. Основной проблемой при переработке пластиковых отходов считается разделение смеси различных типов

пластмасс. Таким образом, существует необходимость в эффективных методах, которые позволяют разделять смеси пластиковых отходов для вторичной переработки.

Флотационное разделение является перспективным методом для разделения смешанных пластиковых отходов [4, 5]. Метод флотационного разделения основан на дифференциальных поверхностных свойствах пластмасс и их способности контактировать с пузырьками воздуха, вводимыми во флотационную камеру [6, 7]. Достижение высокой эффективности разделения с помощью флотации зависит от факторов, таких как тип пластмасс [7], химический состав флотационных реагентов [6], гидродинамические условия флотационной камеры и другие рабочие параметры процесса [8].

Одним из важнейших факторов, действующих на процесс флотационного разделения, является температура рабочего раствора, которая оказывает влияние на физико-химические свойства поверхности пластмасс и, следовательно, на его способность контактировать с пузырьками воздуха [8–12]. Известно, что увеличение температуры рабочего раствора может усилить гидрофобность поливинилхлорида и полистирола и повысить эффективность разделения [10]. Также установлено, что увеличение температуры рабочего раствора с 35 до 50°C приводит к снижению степени разделения смеси, которая состоит из АБС и полистирола на 80%, что может быть связано с зависимостью пенообразующей способности ПАВ от температуры [11].

Известно, что использование поверхностно-активных веществ повышает эффективность разделения смеси пластиковых отходов в процессе флотации [8–15]. Концентрация ПАВ является определяющим фактором, влияющим на флотационное разделение смеси пластиковых отходов. При добавлении в раствор ПАВ происходит изменение поверхностных свойств пластмасс путем снижения поверхностного натяжения между пластмассой и водным раствором. Однако введение ПАВ лимитируется образованием устойчивой пены, которая в свою очередь снижает эффективность разделения смеси пластиковых отходов [12].

При проведении процесса флотации необходимо учитывать скорость потока воздуха, используемого для создания пузырьков газа в объеме рабочего раствора. Недостаточный объем воздуха, подаваемого во флотационную колонну, приводит к образованию малого количества пузырьков газа в рабочем растворе, что снижает эффективность процесса флотации. И наоборот, при избыточном расходе воздуха образуется большое количество пузырьков, часть из

которых не участвует в процессе флотации. Кроме того, избыточные пузырьки воздуха создают локальные турбулентные потоки во флотационной камере, которые могут препятствовать протеканию процесса флотации. Таким образом, подбор оптимального расхода воздуха необходим для достижения высокой эффективности флотационного разделения. Стоит отметить, что расход воздуха, необходимого для достижения максимального извлечения флотированного компонента, зависит от типа используемого полимера [13]. Это связано с тем, что различные типы пластмасс имеют различные свойства и характеристики, которые влияют на их контакт с пузырьками газа и рабочим раствором. Таким образом, оптимальный диапазон значений расхода воздуха для одного типа пластмасс может отличаться от оптимального диапазона для другого типа пластмасс.

Еще одним ключевым фактором флотационного разделения смеси пластиковых отходов является высота столба рабочего раствора. При недостаточной высоте столба снижается вероятность контакта частицы с пузырьком, а при избыточной – повышается вероятность разрушения комплекса «пузырек – частица». Избыточная высота столба жидкости также увеличивает гидравлическое сопротивление при подаче воздуха через аэратор [13, 15].

Процентное соотношение различных типов пластмасс также влияет на эффективность разделения смеси пластиковых отходов [14], а также определяет относительное содержание различных пластиковых материалов в смеси, что влияет на адсорбцию пузырьков воздуха. Оптимальное процентное соотношение для флотационного разделения смеси пластиковых отходов варьирует в зависимости от типов и количества разделяемых пластиков.

Таким образом, установление рабочих параметров флотации, таких как концентрация ПАВ, температура рабочего раствора, расход воздуха, высота столба рабочего раствора, а также соотношение типов пластмасс в исходной смеси, является ключевым фактором для эффективного разделения смесей пластиковых отходов.

Цель работы заключалась в исследовании факторов, влияющих на флотационное разделение смеси полибутилентерефталата и акрилонитрилбутадиенстирола.

Материалы, методы и методики. В качестве объекта исследования использовали смесь ПБТ и АБС цилиндрической формы (рис. 1). Высота цилиндров частиц составляла 3–4 мм, диаметр равен 2–3 мм. Плотность ПБТ составляла (1210 ± 10) кг/м³, АБС – (1119 ± 10) кг/м³.

В качестве ПАВ использовали алкилполиглюкозид С8-С14 (50%) (Green APG 0814

2000 UP, производитель NANJING TICHEM INDUSTRY CO., LTD) – неионогенное поверхностно-активное вещество, представляющее собой светло-желтого цвета, мутный и вязкий водный раствор с массовой долей вещества 50–53 мас. %. pH равен 11,5–12,5. Вязкость (при 25°C) составляла около 1000 мПа · с.

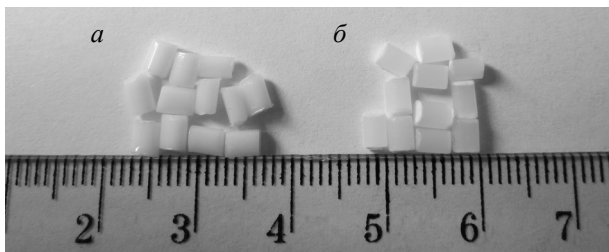


Рис. 1. Исходные образцы измельченных пластмасс:
а – ПБТ; б – АБС

Рабочий раствор готовили в емкости с мешалкой объемом 20 дм³, которую наполняли водой и в нее же добавляли рассчитанное количество ПАВ. Измерение массы ПАВ проводили с помощью аналитических весов OHAUS RV 214 (OHAUS Corporation, Китай) с дискретностью 0,1 мг и погрешностью ±0,3 мг.

Водородный показатель (pH) рабочих растворов измеряли с помощью pH-метра HI 98103 Checker 1 (Hanna instruments, Румыния) с диапазоном измерения pH от 0,00 до 14,00 pH, с дискретностью 0,01 pH и погрешностью ±0,2 pH. Значения pH всех рабочих растворов находились в диапазоне 7,8–8,4.

Температуру рабочего раствора измеряли с помощью термометра HI 98509 Checktemp 1 (Hanna instruments, Румыния) с диапазоном от –50 до +150°C, с дискретностью 0,1°C и погрешностью ±0,2°C.

Навески исходной смеси измельченных пластмассовых отходов, а также твердых фракций пластмасс концентрата и остатка взвешивали с помощью лабораторных весов OHAUS SJX622/E (OHAUS Corporation, Китай) с дискретностью 0,01 г и погрешностью ±0,02 г.

Расход воздуха устанавливали с помощью ротаметра РМ-ГС/0,25 с дискретностью $2,5 \cdot 10^{-3}$ м³/ч и погрешностью $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ м³/ч.

Сжатый воздух в колонну подавали через компрессор АВАС Pole Position 300 (Авас, Италия) с производительностью 300 л/мин и рабочим давлением 8 бар.

Каждый эксперимент повторяли 3 раза и по средним значениям строили зависимости.

Экспериментальные исследования по флотационному разделению смеси измельченных пластмасс проводили на лабораторной установке периодического действия, схема которой представлена на рис. 2.

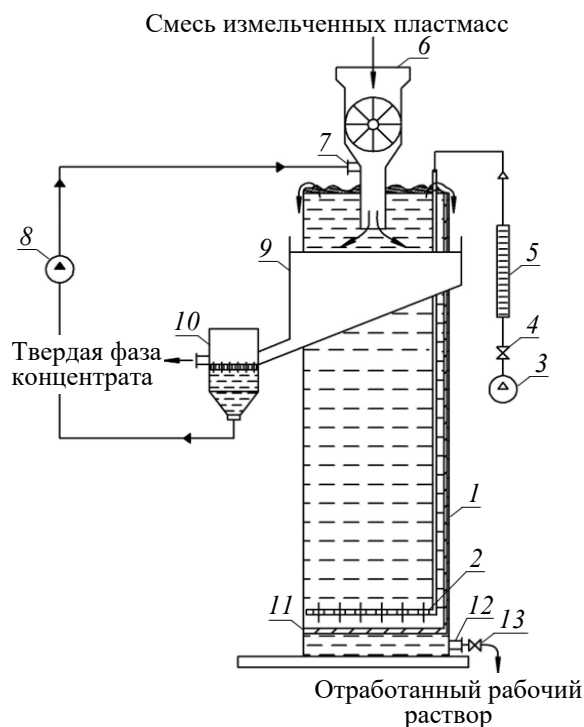


Рис. 2. Схема лабораторной флотационной колонны с пневматической аэрацией:

- 1 – колонна; 2 – спиралевидный аэратор; 3 – компрессор; 4 – вентиль для подачи воздуха; 5 – ротаметр; 6 – ячейковый питатель; 7 – патрубок подачи рабочего раствора; 8 – насос; 9 – сливной желоб; 10 – сепаратор концентрата; 11 – съемная решетка; 12 – патрубок слива отработанного рабочего раствора; 13 – вентиль для слива отработанного рабочего раствора

Флотационную колонну 1, выполненную из прозрачного оргстекла, наполняли раствором ПАВ. Для равномерного распределения пузырьков воздуха в поперечном сечении флотационного аппарата в его нижней части расположен аэратор 2 в виде спирали (диаметр отверстий 0,33 мм и шаг 2,5–3,0 см) с возможностью регулирования высоты столба рабочего раствора для определения ее оптимального значения. В колонну воздух подается через аэратор с помощью компрессора 3. С использованием вентилей 4 и ротаметра 5 устанавливали необходимый расход воздуха. Смесь измельченных пластмасс загружали через ячейковый питатель 6, расположенный в верхней части колонны. Глубина погружения в раствор патрубка питателя составляла $(3,0 \pm 0,5)$ см. Для отвода пенного концентрата методом слива предусмотрена постоянная циркуляция рабочего раствора. С целью предотвращения накопления частиц пластмасс в питателе рабочий раствор возвращается в колонну через патрубок 7 с помощью насоса 8. Пенный продукт по сливному желобу 9 поступает в сепаратор 10, в котором происходит разделение твердой фракции концентрата и рабочего раствора. Сепаратор 10

выполняет также роль накопителя рабочего раствора, необходимого для постоянной циркуляции. После завершения эксперимента отработанный рабочий раствор сливается через патрубок 12 и вентиль 13. Частицы пластмасс (остаток), осевшие на съемную решетку 11 в процессе работы, извлекаются после опустошения колонны.

Окончание процесса разделения смеси считали тот момент времени, в который твердые частицы пластмасс в объеме рабочего раствора не наблюдались. Полученные твердые фракции концентрата и остатка были промыты водой и высушены. Далее для определения доли каждого типа пластмасс в концентрате и остатке выполнялась ручная сортировка по цвету и проводилось взвешивание.

Поверхность частиц ПБТ, обладающая гидрофобными свойствами, формирует при подаче воздуха комплексы «пузырек – частица» с фиктивной плотностью меньше, чем плотность рабочего раствора, что способствует их всплытию на поверхность раствора под действием силы Архимеда. Поверхность частиц АБС, в свою очередь, проявляет гидрофильные свойства, полностью смачивается рабочим раствором, и частицы АБС оседают на дно колонны под действием силы тяжести.

На основании полученных экспериментальных данных рассчитывали степень извлечения флотированного компонента по формуле [7]

$$\varepsilon = \frac{m_{\text{конц}}}{m_{\text{исх}}} \cdot 100\%,$$

где $m_{\text{конц}}$ – масса ПБТ компонента в концентрате, кг; $m_{\text{исх}}$ – масса ПБТ компонента, поданного на флотацию, кг.

Экспериментальная часть. Влияние концентрации ПАВ и высоты столба рабочего раствора на эффективность флотационного разделения смеси ПБТ и АБС представлено на рис. 3. Зависимости получены при расходе воздуха $2,2 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и температуре рабочего раствора $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$. Процентное соотношение смеси ПБТ : АБС составляло 50 : 50.

При концентрации ПАВ $3,88 \cdot 10^{-3} \text{ г/дм}^3$ и высоте столба рабочего раствора в диапазоне 60–70 см степень извлечения ПБТ достигает 95% (рис. 3, б и в). При дальнейшем увеличении концентрации свыше $8 \cdot 10^{-3} \text{ г/дм}^3$ и при высоте столба рабочего раствора 50 см степень извлечения составляет 90% (рис. 3, з). При высоте рабочего раствора 40 см (рис. 3, д) эффективность извлечения свыше 80% достигается при концентрации более $13 \cdot 10^{-3} \text{ г/дм}^3$. С увеличением высоты рабочего раствора выше 80 см (рис. 3, а) степень извлечения ПБТ снижается, вероятно, разрушается комплекс «пузырек – частица». При высоте рабочего раствора 30 см (рис. 3, е)

эффективность разделения не достигает значений выше 60%, что объясняется снижением вероятности контакта частицы с пузырьком.

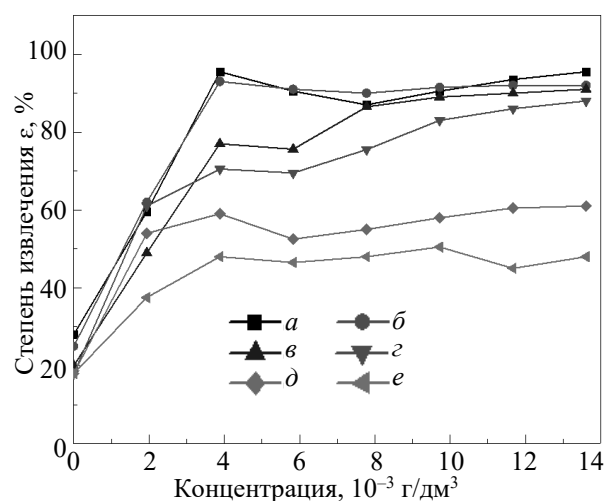


Рис. 3. Зависимости степени извлечения ПБТ от концентрации ПАВ при высоте столба рабочего раствора: а – 80 см; б – 70 см; в – 60 см; з – 50 см; д – 40 см; е – 30 см

Таким образом, высокая эффективность разделения смеси ПБТ и АБС наблюдается в растворе алкилполиглюкозида с концентрацией в диапазоне от $3,88 \cdot 10^{-3}$ до $5,83 \cdot 10^{-3} \text{ г/дм}^3$ и высоте рабочего раствора 60–70 см.

Зависимости влияния температуры и расхода воздуха на эффективность разделения смеси ПБТ и АБС при концентрации ПАВ в рабочем растворе $3,88 \cdot 10^{-3} \text{ г/дм}^3$ и высоте рабочего раствора 70 см представлены на рис. 4. Процентное соотношение смеси ПБТ : АБС составляло 50 : 50.

Из приведенных на рис. 4 зависимостей следует, что при диапазоне температур от 20 до 40°C и расходе воздуха $2,2\text{--}5,5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ степень извлечения ПБТ достигает выше 90%. Стоит отметить, что с увеличением температуры свыше 30°C степень чистоты концентрата снижается, т. е. поверхность частиц АБС становится гидрофобной, контактирует с пузырьками воздуха, образуя комплекс «пузырек – частица», и всплывает на поверхность раствора под действием силы Архимеда. При расходе воздуха $1,1$ и $6,6 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ степень извлечения ПБТ из смеси (процентное соотношение смеси ПБТ : АБС равно 50 : 50) достигает максимального значения 98% при температуре рабочего раствора 40°C . Дальнейшее повышение температуры до 60°C снижает эффективность разделения смеси до 80%. Поэтому наиболее подходящими условиями извлечения ПБТ из исследуемой смеси пластмасс являются расход воздуха в диапазоне от 2,2 до $5,5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и температура рабочего раствора $20\text{--}30^\circ\text{C}$.

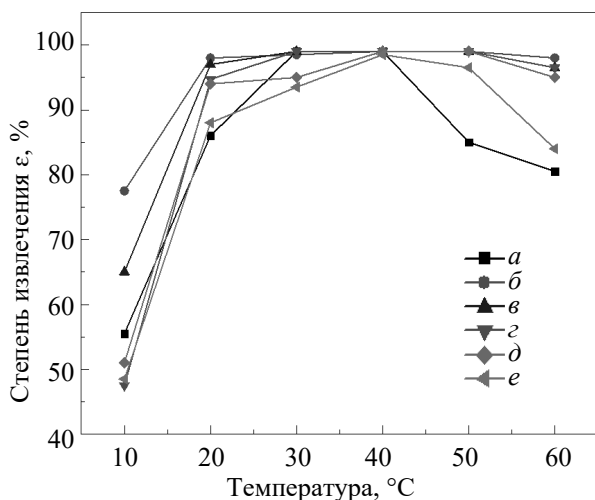


Рис. 4. Зависимости степени извлечения ПБТ от температуры при расходе воздуха: $a - 1,1 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; $b - 2,2 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; $c - 3,3 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; $d - 4,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; $e - 5,5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; $f - 6,6 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

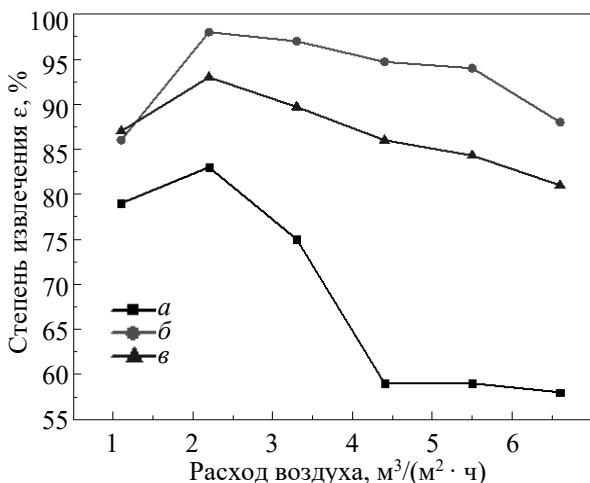


Рис. 5. Зависимости степени извлечения ПБТ от расхода воздуха при процентном соотношении ПБТ : АБС: $a - 25 : 75$; $b - 50 : 50$; $c - 75 : 25$

Влияние процентного соотношения ПБТ и АБС в исходной смеси, подвергавшейся разделению, представлено на рис. 5. Зависимости получены при концентрации ПАВ в рабочем растворе $3,88 \cdot 10^{-3} \text{ г/дм}^3$, при высоте столба рабочего раствора 70 см и температуре раствора $(20 \pm 1)^{\circ}\text{C}$.

Как видно из приведенных на рис. 5 зависимостей, при расходе воздуха $2,2 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ наблюдается максимальное значение степени извлечения ПБТ из смеси ПБТ : АБС в соотношении 25 : 75, которая составляет 83%; в соотношении 50 : 50 – 98%; в соотношении 75 : 25 – 92%. Дальнейшее увеличение расхода воздуха до $6,6 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ снижает эффективность разделения смеси пластмасс до 57% для смеси 25 : 75; до 92% для смеси 50 : 50 и до 83% для смеси 75 : 25. При этом для смеси ПБТ : АБС с соотношением 50 : 50 эффективность разделения сохраняется в диапазоне 92–98%.

Закключение. Исходя из полученных результатов, можно сделать выводы о том, что эффективность разделения смеси измельченных ПБТ и АБС зависит от следующих факторов: концентрации ПАВ, температуры раствора, расхода воздуха и высоты столба рабочего раствора. Также установлено, что процентное соотношение пластмасс в смеси влияет на эффективность флотационного разделения.

Максимальная эффективность флотационного разделения смеси ПБТ : АБС в процентном соотношении 25 : 75 достигается при концентрации ПАВ в рабочем растворе $3,88 \cdot 10^{-3} \text{ г/дм}^3$, при высоте столба рабочего раствора 70 см, при температуре раствора $(20 \pm 1)^{\circ}\text{C}$, при расходе воздуха $2,2 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и составляет 83%.

Установлено оптимальное значение факторов для эффективного флотационного разделения смеси ПБТ и АБС с процентным соотношением 50 : 50: концентрация ПАВ в рабочем растворе $3,88 \cdot 10^{-3} - 5,83 \cdot 10^{-3} \text{ г/дм}^3$, высота рабочего раствора 60–70 см, расход воздуха от 2,2 до $5,5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, температура рабочего раствора 20–30 $^{\circ}\text{C}$. Максимальное значение флотационного разделения (смеси 50 : 50) составило 95–98%.

При процентном соотношении смеси ПБТ : АБС, равном 75 : 25, максимальная эффективность флотационного разделения с концентрацией ПАВ в рабочем растворе $3,88 \cdot 10^{-3} \text{ г/дм}^3$, при высоте столба рабочего раствора 70 см, температуре раствора $(20 \pm 1)^{\circ}\text{C}$, расходе воздуха $2,2 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ составила 92%.

Список литературы

1. Andrady A. L. *Plastics and Environmental Sustainability*. John Wiley & Sons, 2015. 352 p. DOI: 10.1002/9781119009405.
2. The environment and human health: current consensus and future trends / R. C. Thompson [et al.] // *Philosophical Transactions of the Royal Society. B: Biological Sciences*. 2009. Vol. 364, no. 1526. P. 2153–2166. DOI: 10.1098/rstb.2009.0053.
3. Hopewell J., Dvorak R., Kosior E. *Plastics recycling: challenges and opportunities* // *Philosophical Transactions of the Royal Society. B: Biological Sciences*. 2009. Vol. 364, no. 1526. P. 2115–2126. DOI: 10.1098/rstb.2008.0311.

4. Burat F., Güney A., Kangal M. O. Selective separation of virgin and post-consumer polymers (PET and PVC) by flotation method // *Waste Management*. 2009. Vol. 6, no. 29. P. 1807–1813. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.12.018.
5. Wang H., Zhang Y., Wang C. Surface modification and selective flotation of waste plastics for effective recycling – a review // *Separation and Purification Technology*. 2019. Vol. 226. P. 75–94. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.05.052.
6. Fraunholz N. Separation of waste plastics by froth flotation – a review // *Minerals Engineering*. 2004. Vol. 17, no. 2. P. 261–268. DOI: 10.1016/j.mineng.2003.10.028.
7. Alter H. The recovery of plastics from waste with reference to froth flotation // *Resources, Conservation and Recycling*. 2005. Vol. 43, no. 2. P. 119–132. DOI: 10.1016/j.resconrec.2004.05.003.
8. Опимах Е. В., Левданский А. Э. Разделение смеси измельченных акрилонитрилбутадиенстирола и полиамида методом флотации с использованием в качестве поверхностно-активных веществ сульфанола и синтанола // *Труды БГТУ*. 2013. № 3 (159): Химия и технология неорганических веществ. С. 179–181.
9. Флотационное разделение смеси измельченных полимерных отходов / А. Э. Левданский [и др.]. Шымкент: Типография «Элем», 2020. 152 с.
10. Purification of polyethylene terephthalate from polyvinyl chloride by froth flotation for the plastics (soft-drink bottle) recycling industry / J. Drelich [et al.] // *Separation and Purification Technology*. 1999. Vol. 15, no. 1. P. 9–17. DOI: 10.1016/S1383-5866(98)00047-1.
11. Изучение влияния расхода воздуха, высоты слоя жидкости и температуры на процесс флотационной сепарации молотых пластиков / А. Э. Левданский [и др.] // *Известия НАН РК. Серия химия и технологии*. 2020. № 3. С. 36–43.
12. Wang C., Li H. A. Stability and mobility of foam generated by gas-solvent/surfactant mixtures under reservoir conditions // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016. Vol. 34. P. 366–375. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.06.064.
13. Опимах Е. В. Флотационное разделение смеси измельченных вторичных полимеров: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08. Минск, 2017. 25 с.
14. Surface treatment with Fenton for separation of acrylonitrile-butadiene-styrene and polyvinylchloride waste plastics by flotation / J. Wang [et al.] // *Waste Management*. 2017. Vol. 67. P. 20–26. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.05.009.
15. Ковалева А. А., Кулевец П. С., Левданский А. Э. Влияние высоты столба рабочего раствора на флотационное разделение смеси полимерных отходов // *Техника и технология пищевых производств: материалы XV юбилейной Междунар. науч.-техн. конф.: в 2 т., Могилев, 19–20 апр. 2023 г., Могилев, 2023. Т. 1. С. 280–281.*

References

1. Andrady A. L. *Plastics and Environmental Sustainability*. John Wiley & Sons, 2015. 352 p. DOI: 10.1002/9781119009405.
2. Thompson R. C., Moore C. J., Saal F. S., Swan S. H. The environment and human health: current consensus and future trends. *Philosophical Transactions of the Royal Society. B: Biological Sciences*, 2009, vol. 364, no. 1526, pp. 2153–2166. DOI: 10.1098/rstb.2009.0053.
3. Hopewell J., Dvorak R., Kosior E. Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society. B: Biological Sciences*, 2009, vol. 364, no. 1526, pp. 2115–2126. DOI: 10.1098/rstb.2008.0311.
4. Burat F., Güney A., Kangal M. O. Selective separation of virgin and post-consumer polymers (PET and PVC) by flotation method. *Waste Management*, 2009, vol. 6, no. 29, pp. 1807–1813. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.12.018.
5. Wang H., Zhang Y., Wang C. Surface modification and selective flotation of waste plastics for effective recycling – a review. *Separation and Purification Technology*, 2019, vol. 226, pp. 75–94. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.05.052.
6. Fraunholz N. Separation of waste plastics by froth flotation – a review. *Minerals Engineering*, 2004, vol. 17, no. 2, pp. 261–268. DOI: 10.1016/j.mineng.2003.10.028.
7. Alter H. The recovery of plastics from waste with reference to froth flotation. *Resources, Conservation and Recycling*, 2005, vol. 43, no. 2, pp. 119–132. DOI: 10.1016/j.resconrec.2004.05.003.
8. Opimakh E. V., Levdanski A. E. Separation of a mixture of crushed acrylonitrile butadiene styrene and polyamide by flotation using sulfanol and sintanol as surfactants. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 3: Chemistry and Technology of Inorganic Substances, pp. 179–181 (In Russian).

9. Levdanski A. E., Opimakh E. V., Volnenko A. A., Korganbaev B. N., Zhumadullaev D. K. *Flotatsionnoye razdeleniye smesi izmel'chennykh polimernykh otkhodov* [Flotation separation of a mixture of crushed polymer waste]. Shymkent, Tipografiya "Elem" Publ., 2020. 152 p. (In Russian).
10. Drelich J., Kim J. H., Payne T., Miller J. D., Kobler R. W. Purification of polyethylene terephthalate from polyvinyl chloride by froth flotation for the plastics (soft-drink bottle) recycling industry. *Separation and Purification Technology*, 1999, vol. 15, no. 1, pp. 9–17. DOI: 10.1016/S1383-5866(98)00047-1.
11. Levdanski A. E., Opimakh E. V., Volnenko A. A., Zhumadullayev D. K. Study of the effect of air consumption, liquid layer height and temperature on the process of flotation separation of ground plastics. *Izvestiya NAN RK* [Proceedings of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan], Series Chemistry and Technology, 2020, no. 3, pp. 36–43 (In Russian).
12. Wang C., Li H. A. Stability and mobility of foam generated by gas-solvent/surfactant mixtures under reservoir conditions. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 34, pp. 366–375. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.06.064.
13. Opimakh E. V. *Flotatsionnoye razdeleniye smesi izmel'chennykh vtorichnykh polimerov. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Flotation separation of a mixture of crushed secondary polymers. Abstract of thesis PhD (Technology)]. Minsk, 2017. 25 p. (In Russian).
14. Wang J., Wang H., Huang L., Wang C. Surface treatment with Fenton for separation of acrylonitrile-butadiene-styrene and polyvinylchloride waste plastics by flotation. *Waste Management*, 2017, vol. 67, pp. 20–26. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.05.009.
15. Kovaleva A. A., Kulevets P. S., Levdanski A. E. Influence of working solution column height on flotation separation of polymer waste mixture. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv: materialy XV yubileynoy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Technique and Technology of Food Production: materials of the XV Jubilee International Scientific and Technical Conference]. Mogilev, 2023. Vol. 1. P. 280–281 (In Russian).

Информация об авторах

Ковалева Анастасия Александровна – аспирант. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: nastya.covaleva1969@mail.ru

Кулевец Полина Сергеевна – инженер кафедры процессов и аппаратов химических производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: polinka.kulevets@mail.ru

Левданский Александр Эдуардович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой процессов и аппаратов химических производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: alex_levdansky@mail.ru

Information about the authors

Kovaleva Anastasiya Aleksandrovna – PhD student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nastya.covaleva1969@mail.ru

Kulevets Polina Sergeevna – engineer, the Department of Processes and Apparatus for Chemical Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: polinka.kulevets@mail.ru

Levdanski Aleksandr Eduardovich – DSc (Engineering), Professor, Head of the Department of Processes and Apparatus for Chemical Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alex_levdansky@mail.ru

Поступила 05.05.2023