

УДК 678.01:532.696.1:622.765.4

А. А. Ковалева, П. С. Кулевец, А. Э. Левданский

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА КРАЕВОЙ УГОЛ СМАЧИВАНИЯ И ФЛОТАЦИОННОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ ПОЛИБУТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА И АКРИЛОНИТРИЛБУТАДИЕНСТИРОЛА

Предложена методика измерения краевого угла смачивания пластмасс, которая позволяет определить степень смачиваемости их поверхности, на основании чего можно делать предположения о применимости поверхностно-активных веществ как смачивающих агентов в процессе флотационного разделения смеси пластмасс. Исследовано влияние водных растворов поверхностно-активных веществ на краевой угол смачивания и эффективность флотационного разделения смеси полибутилентерефталата и акрилонитрилбутадиенстирола. Определена смачиваемость поверхности указанных пластмасс водными растворами лаурет-3 сульфосукцинат натрия, лаурил саркозинат натрия, полисорбат 80 и алкилполиглюкозид С8-С14 с концентрацией $2 \cdot 10^{-3} - 0.01$ г/дм³. Установлено, что смачиваемость поверхности пластмасс водными растворами поверхностно-активных веществ и эффективность флотационного разделения смеси пластмасс зависят от типа поверхностно-активных веществ и их концентрации в водном растворе.

Ключевые слова: пластмассы, сортировка, флотация, краевой угол смачивания, поверхностно-активные вещества.

Введение. Пластмассы находят широкое применение во многих отраслях промышленности и используются в повседневной жизни. В настоящее время многие товары производятся из пластмасс благодаря их функциональности, прочности и практичности, что привело к огромному росту мирового производства пластмасс за последние 50 лет [1]. Следствием этого роста является то, что твердые пластиковые отходы в глобальном масштабе стали серьезной проблемой для экосистем [2, 3].

Для уменьшения использования первичных пластмасс и сокращения негативного воздействия пластиковых отходов на окружающую среду эти отходы подвергаются переработке. Независимо от используемого при этом метода, эффективность переработки отходов полимеров в значительной степени зависит от их типа и степени неоднородности смеси пластмасс. В настоящее время широко используются индивидуальные и комбинированные методы разделения вторичных пластмасс, такие как ручная и автоматизированная сортировка [4, 5], осаждение и разделение в тяжелой среде [5, 6], электростатическая сепарация [6, 7] и флотация [9–16].

Эффективным методом разделения смеси вторичных пластмасс является пенная флотация, которая основана на использовании различий поверхностей пластмассовых частиц в естественной или искусственной гидрофобности. Принцип пенной флотации заключается в прикреплении пузырька воздуха к гидрофобным частицам для обеспечения их всплытия и извлечения в концентрат, в то время как гидрофильные частицы смачиваются рабочим раствором и под действием силы тяжести оседают на дно флотационного аппарата. Для изменения гидрофобно-гидрофильных свойств поверхности пластмасс используют специальные реагенты — поверхностно-активные вещества (ПАВ) [9–16]. Смачиваемость частиц определяется их поверхностной энергией. Поверхностная энергия твердого тела аналогична поверхностному натяжению жидкости и подразделяется на дисперсионную (неполярную) и специфическую (полярную). Характер смачиваемости частиц (их гидрофобность или гидрофильность) можно предсказать, определив поверхностную энергию частиц и работу их адгезии к водному раствору с помощью различных методов, например, путем измерения краевого угла смачивания частиц [17].

Белорусский государственный технологический университет. 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а; э-почта: nastya.covaleva1969@mail.ru. Поступила 05.09.2023.

Среди более информативных методов измерения краевого угла смачивания твердых тел можно выделить метод "лежащей капли". Этот метод относится к статическим методам определения поверхностного натяжения и основан на измерении параметров профиля капли, которая находится на плоской поверхности твердого тела. Краевой угол смачивания твердого тела определяется как угол между касательной, проведенной к поверхности жидкости через точку соприкосновения жидкости с поверхностью тела, при этом краевой угол смачивания отсчитывается от касательной в сторону жидкой фазы [18–20].

Цель настоящей работы — исследование влияния водных растворов поверхностно-активных веществ на краевой угол смачивания и эффективность флотационного разделения смеси полибутилентерефталата (ПБТ) и акрилонитрилбутадиенстирола (АБС).

Материалы, методы и методика исследования. Исследовалась смесь частиц полибутилентерефталата (ТУ 2253-025-11517367-2002) и акрилонитрилбутадиенстирола (ТУ 2212-019-00203521-96) цилиндрической формы в процентном соотношении 50 : 50. Цилиндрические частицы ПБТ и АБС имели высоту 3–4 мм и диаметр 2–3 мм. Плотность ПБТ составляла $1210 \pm 10 \text{ кг/м}^3$, а плотность АБС — $1119 \pm 10 \text{ кг/м}^3$.

В качестве поверхностно-активных веществ использовались анионные ПАВ:

1) лаурет-3 сульфосукцинат натрия (Setacin 103, производитель Zschimmer&Schwarz, Италия) — прозрачная бесцветная жидкость,

2) лаурил саркозинат натрия (Sodium Lauryl Sarcosinate, производитель PCC Exol SA, Польша) — прозрачная гелеобразная жидкость,

и неионогенные ПАВ:

1) полисорбат 80 (ТВИН 80, производитель Компания "АиС", Россия) — вязкая, маслянистая жидкость светло-желтого цвета,

2) алкилполиглюкозид С8-С14 (Green APG 0814 2000 UP, производитель NANJING TICHEM INDUSTRY CO., LTD) — мутный, вязкий водный раствор светло-желтого цвета с массовой долей вещества 50–53 мас. %.

Температуру и относительную влажность воздуха в лаборатории измеряли с помощью термогигрометра ZHT 100-70 (ADA Instruments, Китай). Температура измерялась в диапазоне от -20 до $+70^\circ\text{C}$ с дискретностью 0.1°C и погрешностью ± 2.0 , а влажность — в диапазоне от 0 до 100% с дискретностью 0.1% и погрешностью ± 3.0 . Для определения микрошероховатости и установления величины краевого угла смачивания из каждого вида полимеров изготавливались образцы призматической формы. Для измерения микрошероховатости поверхности исследуемых пластмасс использовали профилометр SurfTest SJ-210 (Mitutoyo Corporation, Япония). Щупом служил алмазный наконечник радиусом 2 мкм. Измерительное усилие составляло 0.75 мН, ход траверсы — 5.6 мм, и скорость измерения — 0.5 мм/с. Температуру рабочего раствора измеряли с помощью термометра HI 98509 Checktemp 1 (Hanna instruments, Румыния) в диапазоне от -50 до $+150^\circ\text{C}$ с дискретностью 0.1°C и погрешностью ± 0.2 . Сжатый воздух подавали в флотационную колонну через компрессор АВАС Pole Position 300 (Авас, Италия) с производительностью 300 л/мин и рабочим давлением 8 бар. Расход воздуха устанавливали с помощью ротаметра РМ-ГС/0.25 с дискретностью $2.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{ч}$ и погрешностью 0.0001.

Структурная схема установки по определению краевого угла смачивания пластмасс показана на рис. 1. Установка состоит из источника света 1, светофильтра 2 и предметного столика с уровнемером 3 и возможностью регулировки высоты. Через устройство дозирования 6 наносится капля раствора 5 на образец пластмассы 4, расположенный на предметном столике 3. Оптическая система, включающая цифровой фотоаппарат 7, связанный с персональным компьютером 8, фиксирует профиль капли.

Измерение краевого угла смачивания проводилось следующим образом. На предметный столик устанавливалась пластмассовая пластинка, поверхность которой предварительно обезжиривалась этиловым спиртом. С помощью устройства дозирования наносилась капля раствора объемом около 0.05 мл. Затем с помощью цифровой камеры, связанной с персональным компьютером, фиксировался профиль капли, освещаемой источником света. Изображение сохранялось в формате JPEG. Путем увеличения полученного изображения до нужного размера определялся краевой угол смачивания. Эта процедура повторялась

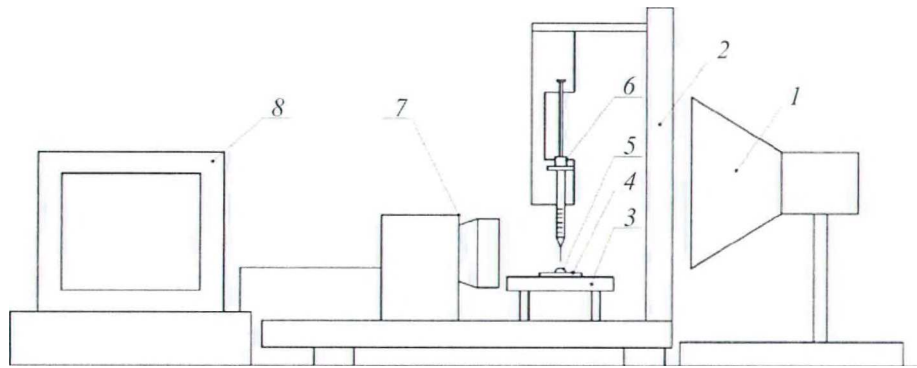


Рис. 1. Структурная схема установки по определению краевого угла смачивания пластмасс: 1 — источник света; 2 — светофильтр; 3 — предметный столик с уровнем; 4 — исследуемый образец; 5 — капля; 6 — устройство дозирования; 7 — цифровой фотоаппарат; 8 — персональный компьютер

10 раз на пяти различных участках поверхности образца. Во время эксперимента температура воздуха поддерживалась в диапазоне $20 \pm 3^\circ\text{C}$, а его относительная влажность составляла $60 \pm 5\%$. Измерения краевого угла смачивания проводились с использованием специального программного обеспечения с онлайн доступом "Drop UI" по лицензионному соглашению. При измерении краевого угла смачивания методом лежащей капли погрешность составляет 3–5% [21].

Краевой угол смачивания определялся по схеме, представленной на рис. 2, в зависимости от свойств поверхности частицы и жидкости в соответствии с законом Юнга:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{\text{т-г}} - \sigma_{\text{т-ж}}}{\sigma_{\text{ж-г}}} \quad (1)$$

Результаты расчетов краевого угла смачивания поверхности исследуемых пластмасс проверялись экспериментально в процессе их флотационного разделения. Экспериментальные исследования по флотационному разделению смеси этих пластмасс проводили на лабораторной установке периодического действия, схема которой представлена на рис. 3. Флотационную колонну 1, выполненную из прозрачного оргстекла, наполняли водным раствором ПАВ. Для равномерного распределения пузырьков воздуха в поперечном сечении флотационного аппарата в его нижней части располагался 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. Воздух в колонну подавался через аэратор с помощью компрессора 3. С использованием вентилей 4 и ротаметра 5 устанавливали необходимый расход воздуха. Смесь пластмасс загружали через ячейковый питатель 6, расположенный в верхней части колонны. Глубина погружения в раствор патрубка питателя составляла 3 ± 0.5 см. Для отвода пенного концентрата



Рис. 2. Структурная схема установки по определению краевого угла смачивания пластмасс: а — жидкость смачивает поверхность твердого тела; б — жидкость не смачивает поверхность твердого тела

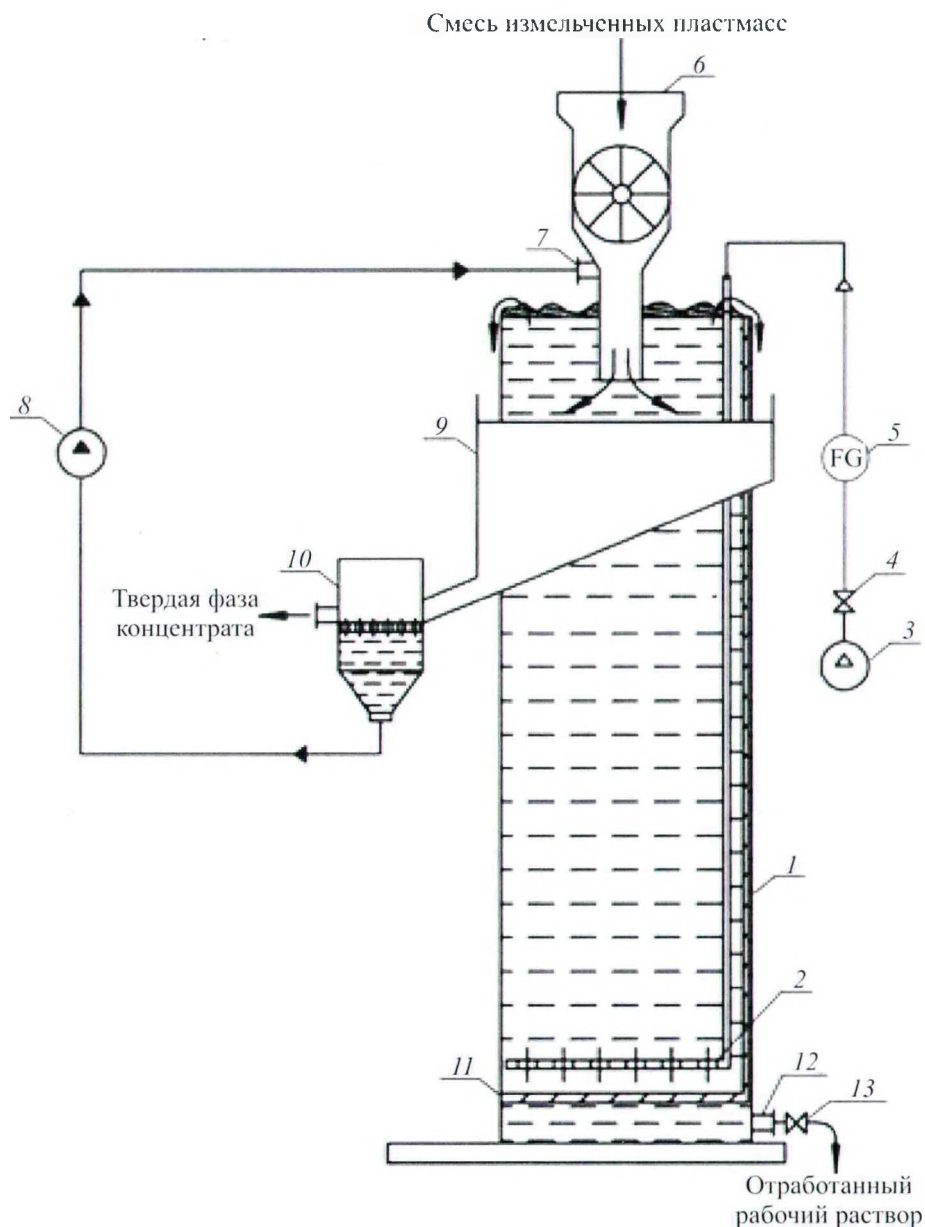


Рис. 3. Схема лабораторной флотационной колонны с пневматической аэрацией: 1 — колонна; 2 — спиралевидный аэратор; 3 — компрессор; 4 — вентиль для подачи воздуха; 5 — ротаметр; 6 — ячейковый питатель; 7 — патрубок подачи рабочего раствора; 8 — насос; 9 — сливной желоб; 10 — сепаратор концентрата; 11 — съемная решетка; 12 — патрубок слива отработанного рабочего раствора; 13 — вентиль для слива отработанного рабочего раствора

методом слива осуществлялась постоянная циркуляция рабочего раствора. С целью предотвращения накопления частиц пластмасс в питателе рабочий раствор возвращался в колонну через патрубок 7 с помощью насоса 8. Пенный продукт поступал по сливному желобу 9 в сепаратор 10, в котором происходило отделение твердой фракции концентрата и рабочего раствора. Сепаратор 10 также выполнял роль накопителя рабочего раствора, необходимого для постоянной циркуляции. После завершения эксперимента отработанный рабочий раствор сливался через патрубок 12 и вентиль 13. Частицы пластмасс (остаток), осевшие на съемной решетке 11 в процессе работы, извлекались после опустошения колонны. Окончанием

процесса разделения смеси считали момент времени, когда частицы пластмасс отсутствовали в объеме рабочего раствора. Полученные фракции концентрата и остатка промывались водой и высушивались. Далее для определения доли каждой пластмассы в концентрате и остатке выполнялась их ручная сортировка по цвету и проводилось взвешивание.

К поверхности частиц пластмасс, обладающей гидрофобными свойствами, прикрепляются пузырьки воздуха, которые подаются в рабочий раствор, образуя при этом комплексы пузырек–частица с фиктивной плотностью, меньшей, чем плотность раствора, что способствует их всплытию под действием силы Архимеда. Поверхность частиц, проявляющая гидрофильные свойства, полностью смачивалась рабочим раствором, и частицы оседали на съемную решетку под действием силы тяжести.

На основании полученных экспериментальных данных рассчитывали степень извлечения флотированного компонента и чистоту его концентрата по формулам [7]

$$\varepsilon = \frac{m_{\text{к}}^{\text{ф}}}{m_{\text{исх}}^{\text{ф}}} \cdot 100\% , \quad \beta = \frac{m_{\text{к}}^{\text{ф}}}{m_{\text{к}}} \cdot 100\% .$$

Экспериментальная часть. В табл. 1 представлены данные по микрошероховатости исследуемых пластмасс. Измерения профиля поверхности образцов пластмасс показали, что микрошероховатость их поверхности составляет ≈ 2 мкм.

Данные по влиянию природы и концентрации водного раствора ПАВ на краевой угол смачивания пластмасс представлены на рис. 4. Поверхности исследуемых пластмасс проявляли гидрофильные свойства к водному раствору лаурет-3 сульфосукцинат натрия (рис. 4, а). При концентрации водного раствора $3.88 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ краевые углы смачивания поверхности АБС и ПБТ составляли 62 ± 2 и 55 ± 2 град соответственно. При дальнейшем увеличении концентрации раствора краевые углы смачивания этих пластмасс увеличивались. Краевые углы смачивания поверхности ПБТ и АБС во всем диапазоне концентраций водных растворов лаурил саркозината натрия изменялись незначительно и находились в диапазоне от 73 до 79 град (рис. 4, б). В данной серии экспериментов не обнаружены закономерности влияния концентрации указанного раствора на краевой угол смачивания пластмасс. Результаты этих экспериментов позволяют прогнозировать низкую эффективность флотационного разделения смеси АБС и ПБТ в водных растворах лаурил саркозината натрия. Краевые углы смачивания поверхности АБС и ПБТ водным раствором полисорбата 80 с концентрацией $1.94 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ составили 83 ± 2 град и 65 ± 2 град соответственно (рис. 4, в). Полученные данные свидетельствуют о вероятности эффективного разделения смеси ПБТ и АБС методом пенной флотации. При увеличенной концентрации водного раствора полисорбата 80 краевые углы смачивания поверхности исследуемых пластмасс составляли 70–80 град. Поверхность ПБТ проявляла гидрофильные свойства к водным растворам алкилполиглюкозида С8-С14 с концентрацией $1.98 \cdot 10^{-3}$ – $5.83 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ и краевой угол смачивания этой поверхности составлял 85–94 град (рис. 5, г). Увеличение концентрации этого раствора до 0.01 г/дм³ приводило к уменьшению краевого угла смачивания поверхности пластмасс. При концентрации водного раствора алкилполиглюкозида С8-С14 $1.98 \cdot 10^{-3}$ – $3.88 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ краевые углы смачивания ПБТ и АБС составили 75 град и 32 ± 2 град соответственно. При увеличении концентрации указанного раствора до $7.78 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ краевой угол смачивания поверхности АБС составил 80 град. Полученные результаты позволяют предположить, что процесс разделения смеси ПБТ и АБС методом пенной флотации в водном растворе алкилполиглюкозида С8-С14

Таблица 1. Параметры микрошероховатости исследуемых образцов пластмасс

| Тип пластмасс | Параметры микрошероховатости | | |
|---------------|------------------------------|----------------|------------------|
| | $R_{\text{ав}}$ | $R_{\text{г}}$ | R_{max} |
| ПБТ | 0.954 | 2.336 | 3.453 |
| АБС | 0.917 | 2.415 | 2.754 |

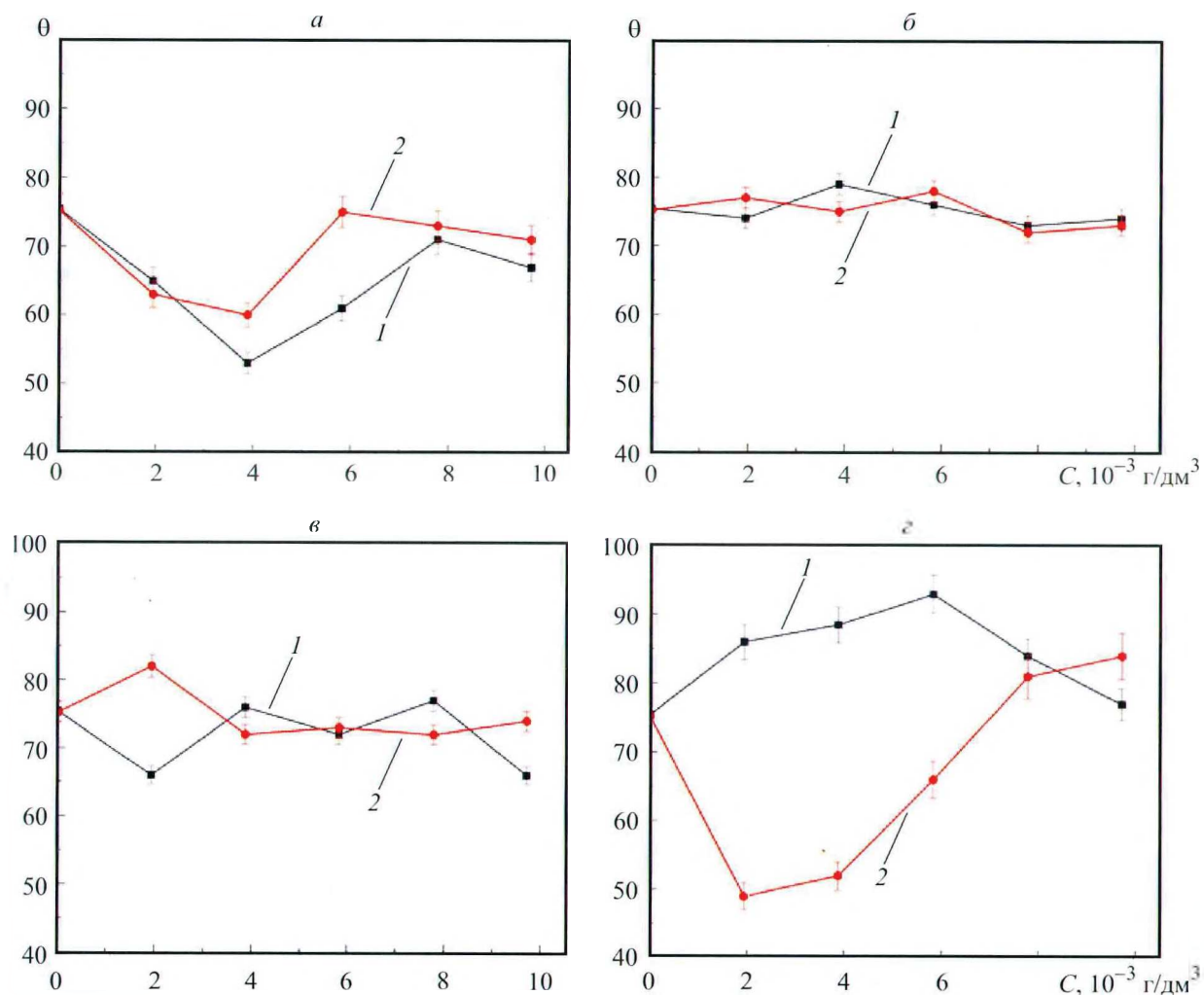


Рис. 4. Зависимость краевого угла смачивания пластмасс от концентрации водных растворов лаурет-3 сульфосукцината натрия (а), лаурил саркозината натрия (б), полисорбата 80 (в) и алкилполиглюкозида С8-С14 (г): 1 — ПБТ; 2 — АБС

с концентрацией $1.94 \cdot 10^{-3}$ – $3.88 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ протекает с высокой эффективностью и что некоторые из исследуемых поверхностно-активных веществ могут быть успешно использованы в качестве смачивающих агентов в процессе флотационного разделения смеси пластмасс.

Для подтверждения сделанных прогнозов и проверки применимости исследуемых поверхностно-активных веществ для эффективного разделения смеси ПБТ–АБС были проведены эксперименты по флотационному разделению этой смеси (рис. 5). Флотационное разделение смеси ПБТ–АБС проводили при расходе воздуха $2.2 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и температуре рабочего раствора $20 \pm 1^\circ\text{C}$. Установлено, что при использовании рабочего раствора лаурет-3 сульфосукцината натрия с концентрацией $5.83 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ частицы ПБТ оседают на дно колонны, а частицы АБС контактируют с пузырьками воздуха и всплывают. Эффективность флотационного разделения смеси достигала 74% (рис. 5, а). Эффективность флотационного разделения смеси АБС и ПБТ в водных растворах лаурил саркозината натрия при исследуемых концентрациях рабочего раствора не превышала 10% (рис. 5, б), что является крайне низким показателем разделения смеси пластмасс АБС и ПБТ, указывающим на нецелесообразность применения данного ПАВ. При использовании в качестве флотационной среды раствора полисорбата 80 с концентрацией $1.94 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ удалось достичь эффективности флотационного разделения смеси ~80%.

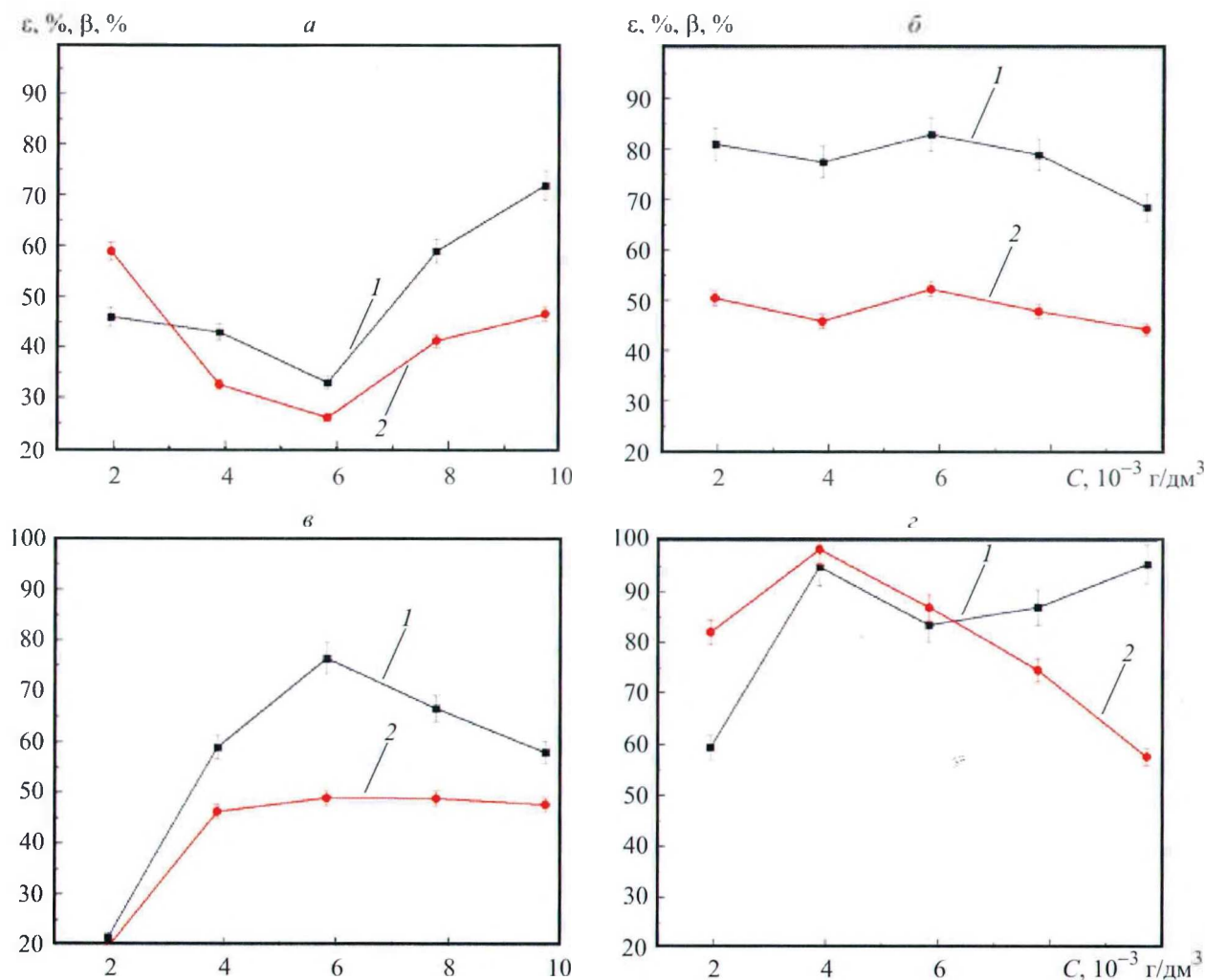


Рис. 5. Зависимость степени извлечения ПБТ (1) и чистоты концентрата (2) от концентрации водных растворов лаурет-3 сульфосукцината натрия (а), лаурил саркозината натрия (б), полисорбата 80 (в) и алкилполиглюкозида С8-С14 (г)

В данном процессе частицы АБС являлись флотирующим компонентом, они контактировали с пузырьками воздуха и всплывали в концентрат, а частицы ПБТ оседали на дно колонны. При концентрации алкилполиглюкозида С8-С14 в рабочем растворе $3.88 \cdot 10^{-3} \text{ г/дм}^3$ степень извлечения ПБТ составила 95%. При увеличении концентрации рабочего раствора до $5.83 \cdot 10^{-3} \text{ г/дм}^3$ степень извлечения ПБТ составила 83.5%. Дальнейшее увеличение концентрации рабочего раствора приводило к снижению эффективности флотационного разделения смеси пластмасс.

Заключение. Проведено флотационное разделение смеси ПБТ–АБС в соотношении 50 : 50 в водных растворах лаурет-3 сульфосукцината натрия, лаурил саркозината натрия, полисорбата 80 и алкилполиглюкозида С8-С14 с концентрацией $2 \cdot 10^{-3}$ – 0.01 г/дм^3 . Максимальная эффективность флотационного разделения смеси в водном растворе лаурет-3 сульфосукцината натрия наблюдалась при концентрации $5.83 \cdot 10^{-3} \text{ г/дм}^3$ и составила 74%.

По значениям краевых углов смачивания поверхности исследуемых пластмасс и данным флотационного разделения смеси АБС и ПБТ с эффективностью около 10% можно сделать вывод, что водные растворы лаурил саркозината натрия нецелесообразны для применения разделения исследуемой смеси пластмасс.

Эффективность флотационного разделения смеси АБС–ПБТ достигала 80% при использовании в качестве рабочего раствора полисорбата 80 с концентрацией $1.94 \cdot 10^{-3}$ г/дм³, а эффективность флотационного разделения этой смеси при использовании водных растворов алкилполиглюкозида C8-C14 с концентрацией $3.88 \cdot 10^{-3}$ – $5.83 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ составила 95.0%, что свидетельствует о высокой эффективности флотационного разделения смеси.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования Республики Беларусь в рамках ГПНИ "Материаловедение, новые материалы и технологии" на 2021–2025 гг., подпрограммы "Многофункциональные и композиционные материалы" и задания 4.2.9 "Исследование физико-химических закономерностей процесса флотационного разделения измельченных пластмассовых отходов".

Обозначения

C — концентрация раствора, г/дм³; m_k^ϕ и $m_{исх}^\phi$ — массы полибутилентерефталата в концентрате и полибутилентерефталата, поданного на флотацию, кг; m_k — масса концентрата, кг; R_z — высота неровностей профиля поверхности по десяти точкам, мкм; R_{max} — наибольшая высота профиля поверхности, мкм; R_a — среднее арифметическое отклонение профиля поверхности, мкм; β — чистота концентрата, %; ε — степень извлечения флотируемого компонента, %; θ — краевой угол смачивания, град; $\sigma_{ж-г}$, $\sigma_{т-ж}$ и $\sigma_{т-г}$ — поверхностные натяжения между жидкостью и газом, твердым телом и жидкостью и твердым телом и газом, Н/м. Индексы: г — газ; ж — жидкость; исх — исходный; к — концентрат; ϕ — флотация; av — средний.

Литература

1. Singh N., Hui D., Singh R., Ahuja I. P. S., Feo L., and Fraternali F. Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications. *Compos. Part B: Eng.* 2017. Vol. 115. Pp. 409–422.
2. Avio C. G., Gorbi S., and Regoli F. Plastics and microplastics in the oceans: From emerging pollutants to emerged threat. *Marine Environ. Res.* 2017. Vol. 128. Pp. 2–11.
3. Hopewell J., Dvorak R., and Kosior E. Plastics recycling: Challenges and opportunities. *Phil. Trans. Roy. Soc. B: Biol. Sci.* 2009. Vol. 364, No. 1526. Pp. 2115–2126.
4. Drain K. F., Murphy W. R., and Otterburn M. S. Polymer waste — Resource recovery. *Conserv. Recycl.* 1981. Vol. 4, No. 4. Pp. 201–218.
5. Gent M. R., Menendez M., Torano J., and Torno S. Optimization of the recovery of plastics for recycling by density media separation cyclones. *Res. Conserv. Recycl.* 2011. Vol. 55, No. 4. Pp. 472–482.
6. Dodbiba G., Sadaki J., Okaya K., and Shibayama A. The use of air tabling and triboelectric separation for separating a mixture of three plastics. *Min. Eng.* 2005. Vol. 18, No. 15. Pp. 1350–1360.
7. Fu S., Fang Y., Yuan H., Tan W., and Dong Y. Effect of the medium's density on the hydrocyclonic separation of waste plastics with different densities. *Waste Manage.* 2017. Vol. 67. Pp. 27–31.
8. Li J. and Xu Z. Compound tribo-electrostatic separation for recycling mixed plastic waste. *J. Hazard. Mater.* 2019. Vol. 367. Pp. 43–49.
9. Левданский А. Э., Опимах Е. В., Волненко А. А., Корганбаев Б. Н., Жумадуллаев Д. К. Флотационное разделение смеси измельченных полимерных отходов. Шымкент: Типография "Элем", 2020.
10. Wang J., Wang H., Wang C., Zhang L., Wang T., and Zheng L. A novel process for separation of hazardous poly(vinyl chloride) from mixed plastic wastes by froth flotation. *Waste Manage.* 2017. Vol. 69. Pp. 59–65.
11. Левданский А. А., Опимах Е. В., Волненко А. А., Жумадуллаев Д. К. Изучение влияния расхода воздуха, высоты слоя жидкости и температуры на процесс флотационного разделения измельченных пластмасс. *Изв. НАН РК. Сер. химия и технологии.* 2020. № 3. С. 36–43.
12. Wang H., Zhang Y., and Wang C. Surface modification and selective flotation of waste plastics for effective recycling — A review. *Sep. Purif. Technol.* 2019. Vol. 226. Pp. 75–94.
13. Опимах Е. В., Левданский А. Э. Разделение смеси измельченных акрилонитрилбутадиенстирола и полиамида методом флотации с использованием в качестве поверхностно-активных веществ сульфанола и синганола. *Тр. БИТУ, Хим. техника, теплотехника и энергосбережение.* 2013. № 3 (159). С. 179–181.
14. Burat F., Güneş A., and Kangal M. O. Selective separation of virgin and post-consumer polymers (PET and PVC) by flotation method. *Waste Manage.* 2009. Vol. 6, No. 29. Pp. 1807–1813.
15. Kangal M. O. Selective flotation technique for separation of PET and HDPE used in drinking water bottles. *Min. Process. Extract. Metal. Rev.* 2010. Vol. 4, No. 31. Pp. 214–223.
16. Wang C., Wang H., Fu J., and Liu Y. Flotation separation of waste plastics for recycling — A review. *Waste Manage.* 2015. Vol. 41. Pp. 28–38.

17. Raichur A. M., Parekh B. K., and Wang X. H. Estimation of surface free energy of pyrites by contact angle measurements. *Min. Eng.* 2001. Vol. 14, No. 1. Pp. 65–75.
18. Mao Y., Xia W., Heng Y., and Xie G. Dynamic pore wetting and its effects on porous particle flotation: A review. *Int. J. Min. Sci. Technol.* 2022. Vol. 32, No. 6. Pp. 1365–1378.
19. Рехвишвили С. Ш., Кишტიкова Е. В. Размерная зависимость краевого угла смачивания. *Физикохимия поверхности и защита материалов.* 2012. Т. 48, № 4. С. 337–340.
20. Сумм Б. Д., Горюнов Ю. В. *Физико-химические основы смачивания и растекания.* Москва: Химия, 1976.
21. Скопинцев И. В., Божко Г. В., Носков С. А., Нечаев В. М. Определение краевого угла смачивания оросителей градири из полимерных композиционных материалов. *Вестн. ТГТУ.* 2017. Т. 23, № 4. С. 665–669.