

DOI: 10.32864/polymmattech-2023-9-3-82-89

УДК 678.01:532.696.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА ВЕЛИЧИНУ КРАЕВОГО УГЛА СМАЧИВАНИЯ ПЛАСТМАСС

А. А. КОВАЛЕВА⁺, П. С. КУЛЕВЕЦ, А. Э. ЛЕВДАНСКИЙ

Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь

Цель работы — установить возможность применения отдельных видов поверхностно-активных веществ (ПАВ) в процессе флотационного разделения вторичных смесей пластмасс путем оценки смачиваемости поверхности полимеров.

В статье приведены результаты исследования краевого угла смачивания акрилонитрилбутадиенстирола (АБС), поливинилхлорида (ПВХ), полиэтилентерефталата (ПЭТФ) и полиамида 6 (ПА6) водными растворами ПАВ с концентрацией от $1 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ до 0,1 г/дм³. Использовали оригинальную установку, разработанную авторами. Установлено, что при концентрации водного раствора лаурилсульфата натрия $1 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ и $5 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ поверхность ПА6 и ПЭТФ проявляет гидрофобные свойства, так как краевой угол смачивания выше 90 град., что свидетельствует о возможности разделения смеси методом пенной флотации. Поверхности АБС, ПВХ и ПЭТФ проявляли слабые гидрофильные свойства к водным растворам сорбитан стеарата с концентрацией $1 \cdot 10^{-3}$ –0,1 г/дм³, что подтверждается краевыми углами смачивания, которые находились в диапазоне 71–94 град. соответственно. При использовании водных растворов полисорбата 80 с концентрацией 0,05–0,10 г/дм³ поверхность ПА6 начинает проявлять ярко выраженные гидрофильные свойства в отличие от других исследуемых пластмасс, что позволяет прогнозировать возможность выделения ПА6 из исследуемой смеси пластмасс (АБС, ПВХ, ПЭТФ, ПА6) методом пенной флотации.

Ключевые слова: метод лежащей капли, пластмассы, рабочий раствор, концентрация, разделение вторичных пластмасс, пенная флотация.

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE CONCENTRATION OF SURFACTANTS AQUEOUS SOLUTIONS ON THE CONTACT ANGLE OF WETTING OF PLASTICS

A. KOVALEVA⁺, P. KULEVETS, A. LEVDANSKI

Belarusian State Technological University, Sverdlov St., 13a, 220006, Minsk, Belarus

The purpose of the work is to establish the possibility of using certain types of surfactants in the process of flotation separation of secondary mixtures of plastics by evaluating the wettability of the polymer surface.

This article presents research on the contact angle of wetting of acrylonitrile butadiene styrene (ABS), polyvinyl chloride (PVC), polyethylene terephthalate (PET) and polyamide 6 (PA6) using aqueous solutions of surfactants with concentrations ranging from $1 \cdot 10^{-3}$ to 0,1 dm³. The original installation developed by the authors was used. It was found that the concentration of aqueous sodium lauryl sulfate $1 \cdot 10^{-3}$ and $5 \cdot 10^{-3}$ g/dm³ of PA and PET exhibit hydrophobic properties, as the wetting edge angle

⁺ Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: nastya.covaleva1969@mail.ru

is higher than 90 degrees, which indicates the probability of separation of the mixture by froth flotation. ABS, PVC and PET surfaces showed weak hydrophilic properties to aqueous solutions of sorbitan stearate with a concentration of $1 \cdot 10^{-3}$ – 0.1 g/dm^3 , which is confirmed by the edge wetting angles, which were in the range of 71–94 degrees. When using aqueous solutions of polysorbate 80 with a concentration of 0.05 – 0.1 g/dm^3 , the surface of PA6 begins to show pronounced hydrophilic properties in contrast to other studied plastics, which allows predicting good separability of PA6 from the studied mixture of plastics (ABS, PVC, PET, PA6) by froth flotation.

Keywords: the method of the lying drop, plastics, working solution, concentration, separation, froth flotation.

Введение

В последние годы пластиковые отходы стали одной из главных экологических проблем, поскольку ежегодно производится свыше 300 миллионов тонн пластмасс, значительная часть которых попадает в окружающую среду [1, 2]. В связи с чем, переработка пластмасс привлекает все больше внимания по социальным и экологическим причинам [2–4]. Поскольку совместная переработка пластмасс с различной химической структурой ухудшает физико-механические свойства вторичных пластмасс — селективное разделение является неотъемлемой частью процесса переработки пластмассовых отходов.

На сегодняшний день существует множество различных способов разделения пластмасс, таких как ручная сортировка, сортировка по плотности, флотация, осаждение, селективное растворение, инфракрасная спектроскопия, рентгеновский анализ, способ глубокого охлаждения, электростатические, химические способы и другие [5]. Одним из эффективных и менее энергозатратных методов разделения пластмасс является пенная флотация. Суть процесса пенной флотации заключается в использовании пузырьков газа для «захвата» частиц, находящихся в рабочем растворе, на основе их гидрофобных и гидрофильных свойств [5, 6].

Большинство пластмасс проявляют гидрофобные свойства по отношению к воде, что затрудняет применение метода флотации для их разделения. Для изменения гидрофобно-гидрофильных свойств поверхности пластмасс используют специальные реагенты — поверхностно-активные вещества (ПАВ) [4–9], которые подразделяются на анионные (додецилсульфат натрия, лаурилсульфат натрия и др.), катионные (цетилтриметил аммоний бромид, алкилдиметилбензиламмоний хлорид и др.), неионогенные (полиэтиленгликоль, полисорбат и др.) и амфотерные (кокамидопропил бентоин, кокоамфоацетат натрия и др.). При выборе ПАВ для эффективного флотационного разделения пластмасс необходимо учитывать тип пластмасс, их химические и поверхностные свойства, а также физико-химические свойства ПАВ [10].

Одним из наиболее важных факторов, влияющих на процесс флотации, является смачиваемость поверхности пластмасс, мерой которой является

краевой угол смачивания (θ), и определяется как угол между касательной, проведенной к поверхности жидкости через точку соприкосновения трех сред и поверхностью твердого тела, при этом краевой угол смачивания отсчитывается от касательной в сторону жидкой фазы [11, 12]. Краевой угол смачивания отражает вероятность контакта поверхности частиц пластмасс с пузырьками воздуха в процессе флотационного разделения.

Известно [13], что значения краевого угла смачивания определяют различными методами: по профилю пузырька; методом прямой пластины (метод Вильгельми); методом наклонной пластины; методом лежащей капли. Одним из более простых и доступных методов измерения краевого угла смачивания является метод лежащей капли. Данный метод определения краевого угла смачивания относится к статическим методам определения поверхностного натяжения, т. е. поверхность неподвижна в момент измерения. Метод основан на определении параметров профиля капли, лежащей на плоской поверхности твердого тела. Для этого каплю необходимо сфотографировать и по фотографии определить необходимые для расчета краевого угла смачивания параметры.

Цель работы — установление возможности применения отдельных видов ПАВ в процессе флотационного разделения вторичных смесей пластмасс путем оценки смачиваемости поверхности полимеров.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования использовали пластинки размером $30 \times 30 \times 10$ мм акрилонитрилбутадиенстирола (АБС) ТУ 2214-019-00203521-96, поливинилхлорида (ПВХ) ТУ 6-05751768-60-93, полиэтилентерефталата (ПЭТФ) по ГОСТ 32686 и полиамида 6 (ПА6) ТУ РБ 500048054.037-2002.

В качестве ПАВ использовали лаурилсульфат натрия, лаурет-3 сульфосукцинат натрия, натрия лаурилсаркозинат, алкилглюкозид, сорбитан стеарат, полисорбат 80, этоксиат алкилового спирта, кокосовый диэтаноламид и кокамидопропил бентоин, характеристики которых приведены в табл. 1.

Рабочий раствор готовили в колбе, которую наполняли дистиллированной водой, добавляли рассчитанное количество ПАВ и тщательно перемешивали с помощью магнитной мешалки.

Таблица 1 — Характеристики ПАВ
Table 1 — Characteristics of surfactants

Название ПАВ	Тип	pH 1%-ного раствора	Примечание
Лаурилсульфат натрия <i>Galaxy LES 70</i> («Galaxy Chemical», Египет)	анионный	$7,2 \pm 0,2$	высоковязкая жидкость светло-желтого цвета
Лаурет-3 сульфосуцинат натрия <i>Setasin 103</i> («Zschimmer&Schwarz», Италия)	анионный	$6,1 \pm 0,1$	прозрачная бесцветная жидкость
Натрия лаурил саркозинат <i>Sodium Lauryl Sarcosinate</i> («PCC Exol SA», Польша)	анионный	$7,8 \pm 0,1$	прозрачная гелеобразная жидкость
С 8-14 алкилглюкозид (50%) <i>Glucopon 425 N/HH</i> («BASF», Германия)	неионогенный	$8,1 \pm 0,2$	жидкость светло-желтого цвета
Сорбитан стеарат Сорбитан С («СкайПром», Россия)	неионогенный	$6,3 \pm 0,1$	чешуйчатое вещество светло-желтого цвета
Полисорбат 80 ТВИН 80 («АиС», Россия)	неионогенный	$6,7 \pm 0,1$	вязкая, маслянистая жидкость светло-желтого цвета
Этоксилат алкилового спирта <i>ROKanol® T23</i> («PCC Exol SA», Польша)	неионогенный	$7,2 \pm 0,2$	пластинки белого цвета
Дистаноламид жирных кислот кокосового масла <i>ROKamid KAD</i> («PCC Exol SA», Польша)	неионогенный	$7,5 \pm 0,2$	прозрачная жидкость желтого цвета
Кокамидопропил бентоин <i>Cocoami-dopropyl betaine</i> («Matrix Oleochem Sdn. Bhd.», Малайзия)	амфотерный	$5,0 \pm 0,2$	вязкая жидкость светло-желтого цвета

Измерение массы ПАВ проводили с помощью аналитических весов «ОНАУС RV 214» («ОНАУС Corporation», КНР), с дискретностью 0,1 мг и погрешностью $\pm 0,3$.

Водородный показатель (pH) растворов ПАВ измеряли с помощью pH-метра «НН 98103 Checker 1» («Нанпа instruments», Румыния), с диапазоном измерения pH от 0,00 до 14,00, с дискретностью 0,01 и погрешностью $\pm 0,2$.

Температуру и относительную влажность воздуха в лаборатории измеряли с помощью термогигрометра «ZHT 100-70» («ADA Instruments», КНР), с диапазоном измерения температур от минус 20 °C до плюс 70 °C, с дискретностью 0,1 °C и погрешностью $\pm 2,0$. Диапазон измерения влажности составляет от 0% до 100%, с дискретностью 0,1% и погрешностью $\pm 3,0$.

Для измерения микрощероховатости 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,

скорость измерения 0,5 мм/с.

Для определения краевого угла смачивания авторамы была разработана установка, представленная на рис. 1, структурная схема представлена на рис. 2 [14].

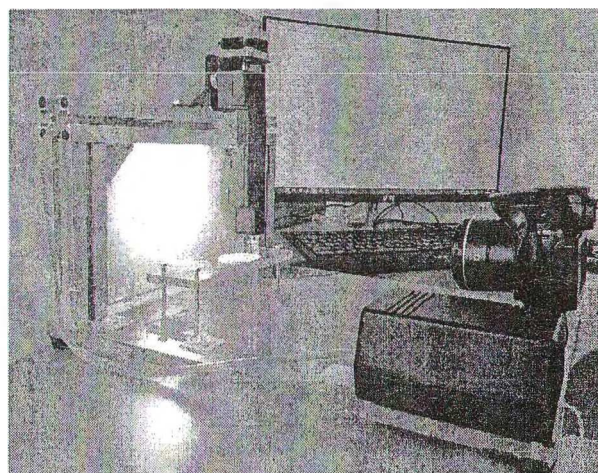


Рисунок 1 — Установка по определению краевого угла смачивания

Fig. 1 — Installation for determining the wetting angle

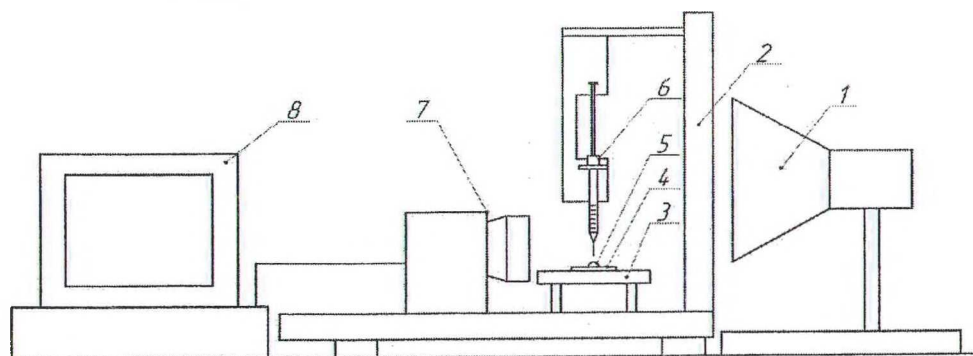


Рисунок 2 — Структурная схема установки по определению краевого угла смачивания: 1 — источник света; 2 — светофильтр; 3 — предметный столик с уровнем; 4 — исследуемый образец; 5 — капля; 6 — устройство дозирования; 7 — цифровой фотоаппарат; 8 — персональный компьютер

Fig. 2 — Structural scheme of the installation for determining the contact angle of wetting: 1 — light source; 2 — optical filter; 3 — stage with level meter; 4 — investigated sample; 5 — droplet; 6 — dispensing device; 7 — digital camera; 8 — personal computer

Установка по определению краевого угла смачивания состоит из источника света 1, светофильтра 2, предметного столика с уровнем 3, обеспечивающим возможность установления горизонта. Предметный столик регулируется по высоте. С помощью устройства дозирования 6 (рис. 3) наносят каплю раствора 5 на исследуемый образец пластмассы 4 расположенный на предметном столике 3. Оптическая система, включающая цифровой фотоаппарат 7, связанный с персональным компьютером 8, фиксирует профиль капли.

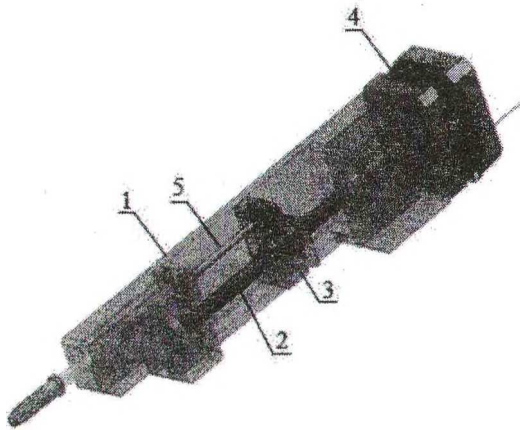


Рисунок 3 — Устройство дозирования капли: 1 – корпус; 2 – вращающийся вал с резьбой; 3 – каретка; 4 – шаговый электродвигатель; 5 – поршень
Fig. 3 — Droplet dispensing device: 1 – housing; 2 – rotating shaft with thread; 3 – carriage; 4 – stepper motor; 5 – piston

Самодозирующее устройство, представленное на рис. 3, состоит из корпуса 1, в котором установлены подшипники. В подшипниках закреплен вращающийся вал с резьбой 2, по которому перемещается каретка 3. Внешний конец вала через муфту соединен с шаговым электродвигателем 4. В каретку крепится подвижный край поршня 5. В корпус 1 устанавливается шприц. Контакты шагового электродвигателя соединены с контроллером ESP32, в котором установлено открытое программное обеспечение ESP32 GRBL.

Измерение краевого угла смачивания проводили

следующим образом: на предметный столик устанавливали исследуемый пластмассовый образец, поверхность которого предварительно обезжиривали этиловым спиртом. С помощью устройства дозирования капли наносили каплю раствора объемом 0,05 мл. Затем каплю освещали источником света, а ее профиль фиксировали при помощи цифровой камеры, связанной с персональным компьютером. Изображение сохраняли в формате JPEG. Полученные изображения увеличивали до нужного размера и по фотографии профиля капли определяли краевой угол смачивания. Данную процедуру повторяли 10 раз на пяти различных участках поверхности образца. При выполнении эксперимента температуру воздуха поддерживали в диапазоне 20 ± 3 °C, относительную влажность воздуха — в диапазоне 60 ± 5 %. Измерения краевого угла смачивания проводили с помощью специального программного обеспечения с онлайн доступом Drop UI, по лицензионному соглашению. При измерении краевого угла методом лежащей капли погрешность составляла 3–5%. Краевой угол смачивания определяли по схеме, представленной на рис. 4.

Краевой угол смачивания связан со свойствами поверхности и свойствами жидкости и определяется согласно закону Юнга:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{ТГ} - \sigma_{ТЖ}}{\sigma_{ЖГ}}$$

где $\sigma_{ТЖ}$, Н/м — поверхностное натяжение между твердым телом и жидкостью; $\sigma_{ЖГ}$, Н/м — поверхностное натяжение между жидкостью и газом; $\sigma_{ТГ}$, Н/м — поверхностное натяжение по границе между твердым телом и газом.

Результаты и их обсуждение

В табл. 2 представлены данные микрошероховатости исследуемых образцов пластмасс, где R_a — среднее арифметическое отклонение профиля, мкм; R_z — высота неровностей профиля по десяти точкам, мкм; R_{max} — наибольшая высота профиля, мкм.

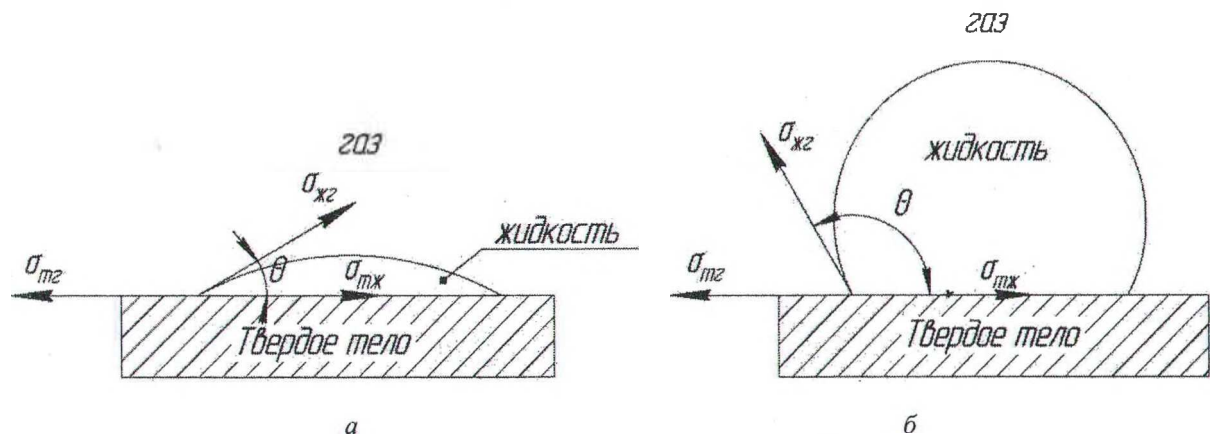


Рисунок 4 — Краевой угол смачивания θ : а – жидкость смачивает поверхность твердого тела; б – жидкость не смачивает поверхность твердого тела
Fig. 4 — Contact angle of wetting θ : а – the liquid wets the surface of a solid; б – the liquid does not wet the surface of a solid

Данные о микрошероховатости исследуемых образцов пластмасс, представленные в табл. 2, свидетельствуют от том, что образцы имеют ровную поверхность, и шероховатость поверхности пластмасс можно не учитывать при расчете краевого угла смачивания.

Влияние природы ПАВ и концентрации водного раствора на краевой угол смачивания представлены на рис. 5. Из данных, представленных на рис. 5, видно, что при концентрации водного раствора лаурилсульфата натрия $1 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ и $5 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ для ПА и ПЭТФ краевой угол смачивания выше 90 град., что

свидетельствует о несмачиваемости поверхности пластмасс водным раствором ПАВ. С увеличением концентрации водного раствора до 0,1 г/дм³ краевой угол смачивания для всех исследуемых типов пластмасс уменьшался до 27–33 град., что говорит о проявлении гидрофильных свойств поверхности пластмасс. Также гидрофильные свойства поверхности исследуемых пластмасс наблюдались и при использовании водных растворов кокамидопропил бентонина с концентрацией 0,1 г/дм³, краевые углы смачивания находились в диапазоне от 22 град. до 29 град.

Таблица 2 — Параметры микрошероховатости исследуемых образцов пластмасс
Table 2 — Parameters of micro-roughness of the investigated plastic samples

Тип пластмасс											
АБС			ПВХ			ПЭТФ			ПА6		
R_a	R_z	R_{max}	R_a	R_z	R_{max}	R_a	R_z	R_{max}	R_a	R_z	R_{max}
0,917	2,415	2,754	1,627	5,711	9,313	1,159	3,916	6,663	1,122	2,874	6,929

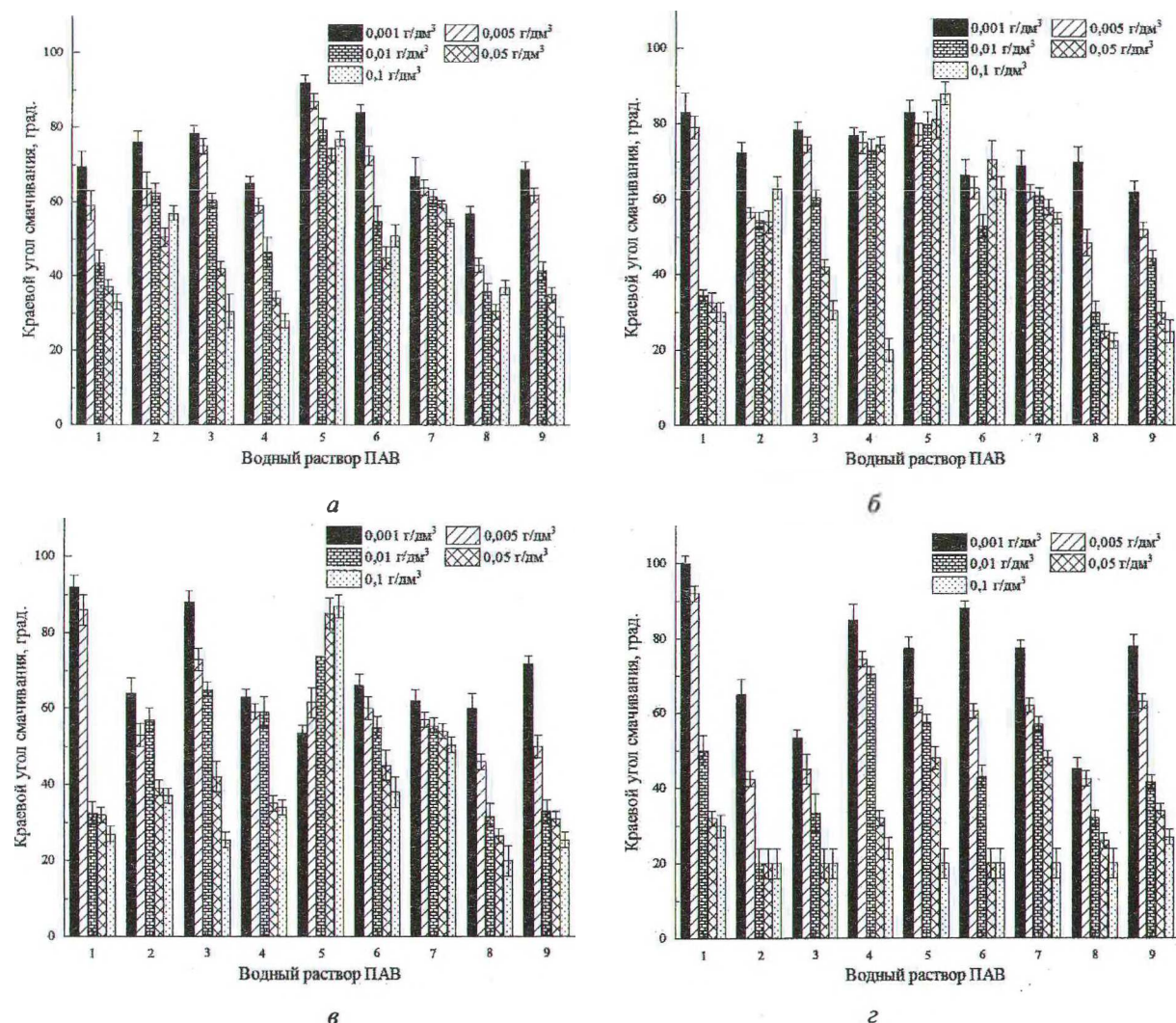


Рисунок 5 — Краевые углы смачивания пластмасс водными растворами ПАВ: а — АБС; б — ПВХ; в — ПЭТФ; г — ПА6. 1 — лаурилсульфат натрия; 2 — лаурет-3 сульфосукцинат натрия; 3 — лаурилсарказинат натрия; 4 — алкилглюкозид; 5 — сорбитан стеарата; 6 — полисорбат 80; 7 — этоксилат алкилового спирта; 8 — диэтаноламид жирных кислот кокосового масла; 9 — кокамидопропил бентонин
Fig. 5 — Wetting edge angles of plastics with aqueous solutions of surfactants: а — ABS; б — PVC; в — PET; г — PA6. 1 — sodium lauryl sulfate; 2 — sodium laureth-3 sulfosuccinate; 3 — sodium lauryl sarcosinate; 4 — alkyl glucoside; 5 — sorbitan stearate; 6 — polysorbate 80; 7 — alkyl alcohol ethoxylate; 8 — coconut oil fatty acid diethanolamide; 9 — cocamidopropyl bentoin

Краевые углы смачивания АБС и ПВХ с увеличением концентрации водного раствора лаурет-3 сульфосукцината натрия с $1 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ до $5 \cdot 10^{-2}$ г/дм³ плавно уменьшались с 73 град. до 55 град. и с 79 град. до 68 град. соответственно, при дальнейшем увеличении концентрации водного раствора до $0,1$ г/дм³ краевые углы смачивания находились в диапазоне 58–66 град. Краевые углы смачивания ПЭТФ с увеличением концентрации водного раствора лаурет-3 сульфосукцината натрия с $1 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ до $0,1$ г/дм³ плавно уменьшались с 68 град. до 35 град., что свидетельствует о проявлении гидрофильных свойств поверхности.

Водные растворы Лаурет-3 сульфосукцината натрия с концентрацией $5 \cdot 10^{-2}$ – $0,1$ г/дм³, а также этоксилата алкилового спирта $0,1$ г/дм³ практически полностью смачивали поверхность ПА6.

При концентрации водного раствора лаурилсарказината натрия $1 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ краевой угол смачивания ПЭТФ составлял 86–91 град. Краевые углы смачивания АБС и ПВХ при концентрации водного раствора лаурилсарказината натрия $1 \cdot 10^{-3}$ – $5 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ составляли 71–81 град. Дальнейшее увеличение концентрации приводило к снижению краевого угла смачивания АБС и ПВХ до 26 град. Поверхность ПА6 проявляла гидрофильные свойства к исследуемым водным растворам лаурилсарказината натрия.

Поверхности исследуемых пластмасс проявляли гидрофильные свойства к водным растворам алкилглюкозида с концентрацией $0,05$ – $0,1$ г/дм³, краевые углы смачивания составляли 21–46 град. При концентрации водного раствора алкилглюкозида $1 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ краевой угол смачивания ПВХ и ПА6 составил 75–93 град., что свидетельствует о проявлении поверхностями ПВХ и ПА6 слабых гидрофильных свойств.

Поверхности АБС, ПВХ и ПЭТФ проявляли к водным растворам сорбитан стеарата с концентрацией $1 \cdot 10^{-3}$ – $0,1$ г/дм³ слабые гидрофильные свойства и краевые углы смачивания находились в диапазоне 71–94 град. Краевой угол смачивания ПА6 при концентрации водного раствора $1 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ составлял 75–80 град., дальнейшее увеличение концентрации до $0,1$ г/дм³ привело к снижению значения краевого угла смачивания ПА6 менее 20 град., что свидетельствует о проявлении поверхности ПА6 гидрофильных свойств.

Краевые углы смачивания АБС и ПА6 при концентрации водного раствора полисорбата 80 $1 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ составляли 82–89 град. Для ПВХ краевые углы смачивания при исследуемых водных растворах полисорбата 80 с концентрацией $1 \cdot 10^{-3}$ – $0,1$ г/дм³ составляли 61–76 град. Полное смачивание ПА6 наблюдалось при концентрации водного раствора полисорбата 80 $0,05$ – $0,1$ г/дм³. Краевые углы смачивания ПЭТФ уменьшаются с 62 град. до 34 град. при увеличении концентрации водного раствора полисорбата 80 с $1 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ до $0,1$ г/дм³.

Смачиваемость водными растворами этоксила-

та алкилового спирта АБС, ПЭТФ и ПВХ практически одинакова и краевые углы смачивания при концентрации водного раствора от $1 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ до $0,1$ г/дм³ практически не изменялись и находились в диапазоне 50–70 град.

Водные растворы диэтаноламида жирных кислот кокосового масла проявляли высокую смачивающую способность по отношению к исследуемым пластмассам и при концентрации $5 \cdot 10^{-2}$ г/дм³ краевые углы смачивания составляли 23–28 град., дальнейшее увеличение концентрации раствора до $0,1$ г/дм³ приводило к снижению значений краевых углов смачивания менее 24 град. для ПВХ, ПЭТФ и ПА6, а для АБС — к увеличению до 38 град.

Выводы

Полученные экспериментальные результаты подтверждают возможность применения исследуемых поверхностно-активных веществ в качестве смачивающих агентов в процессе флотационного разделения пластмасс.

На основе явления смачиваемости поверхности можно предположить, что при использовании водного раствора лаурет-3 сульфосукцината натрия с концентрацией $5 \cdot 10^{-2}$ – $0,1$ г/дм³, а также этоксила алкилового спирта $0,1$ г/дм³ можно выделить ПА6 из смеси пластмасс (АБС, ПВХ, ПЭТФ и ПА6) методом пенной флотации. Высока вероятность выделения полиамида 6 из других смесей полимеров, но для это требуются дополнительные исследования.

При концентрации водного раствора лаурилсарказината натрия $1 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ краевой угол смачивания ПЭТФ составлял 86–91 град., что дает вероятность предположить флотационное разделение исследуемой смеси пластмасс (АБС, ПВХ, ПЭТФ, ПА6) с выделением полиэтилентерефталата.

Поверхности АБС, ПВХ и ПЭТФ проявляли слабые гидрофильные свойства (краевые углы смачивания 71–94 град.) к исследуемым водным растворам сорбитан стеарата, что позволяет предположить неприменимость данного ПАВ для разделения смеси исследуемых пластмасс методом пенной флотации.

На основе явления смачиваемости поверхности можно предположить, что при использовании водного раствора полисорбата 80 с концентрацией $0,05$ – $0,1$ г/дм³ можно выделить из исследуемой смеси полимеров (АБС, ПВХ, ПЭТФ, ПА6) ПА6 методом пенной флотации.

Также можно предположить возможность выделения ПА6 и ПЭТФ из смеси пластмасс (АБС, ПВХ, ПЭТФ и ПА6) методом пенной флотации при использовании водного раствора лаурилсульфата натрия с концентрацией $1 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ и $5 \cdot 10^{-3}$ г/дм³.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования Республики Беларусь в рамках

ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» 2021–2025 гг., подпрограмма «Многofункциональные и композиционные материалы», задание 4.2.9: «Исследование физико-химических закономерностей процесса флотационного разделения измельченных пластмассовых отходов» № гос. регистрации 20211327.

Обозначения

АБС — акрилонитрилбутадиенстирол; ПВХ — поливинилхлорид; ПЭТФ — полиэтилентерефталат; ПАБ — полиамид 6; ПАВ — поверхностно-активное вещество; θ , град. — краевой угол смачивания; R_c , мкм — среднее арифметическое отклонение профиля; R_z , мкм — высота неровностей профиля по десяти точкам; R_{max} , мкм — наибольшая высота профиля; $\sigma_{жж}$, Н/м — поверхностное натяжение между твердым телом и жидкостью; $\sigma_{жг}$, Н/м — поверхностное натяжение между жидкостью и газом; $\sigma_{тг}$, Н/м — поверхностное натяжение по границе между твердым телом и газом.

Литература

1. Marine plastic pollution // International Union for Conservation of Nature Issues Brief. 2021 [Электронный ресурс]. URL: https://www.iucn.org/sites/default/files/2022-04/marine_plastic_pollution_issues_brief_nov21.pdf (дата обращения: 05.05.2023).
2. MacLeod M., Arp H. P. H., Tekman M. B., Jahnke A. The global threat from plastic pollution // *Science*, 2021, vol. 373, is. 6550, pp. 61–65. doi: 10.1126/science.abg5433
3. Milbrandt A., Coney K., Badgett A., Beckham G.T. Quantification and evaluation of plastic waste in the United States // *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, vol. 183. doi: 10.1016/j.resconrec.2022.106363
4. Левданский А. Э., Опимакх Е. В., Волненко А. А., Корганбаев Б. Н., Жумадуллаев Д. К. Флотационное разделение смеси измельченных полимерных отходов. Шымкент: Элем, 2020. 152 с.
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. Опимакх Е. В., Левданский А. Э. Разделение смеси измельченных акрилонитрилбутадиенстирола и полиамида методом флотации с использованием в качестве поверхностно-активных веществ сульфанола и синтанолола // Труды БГТУ. Химия и технология неорганических веществ. 2013. № 3 (159). С. 179–181.
7. Burat F., Güneş A., Kargal M. O. Selective separation of virgin and post-consumer polymers (PET and PVC) by flotation method // *Waste Management*, 2009, vol. 29, no. 6, pp. 1807–1813. doi: 10.1016/j.wasman.2008.12.018
8. Kargal M. O. Selective flotation technique for separation of PET and HDPE used in drinking water bottles // *Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review*, 2010, vol. 31, no. 4, pp. 214–223. doi: 10.1080/08827508.2010.483362
9. Wang C., Wang H., Fu J., Liu Y. Flotation separation of waste plastics for recycling – A review // *Waste Management*, 2015, vol. 41, pp. 28–38. doi: 10.1016/j.wasman.2015.03.027
10. Shen H., Pugh R.J., Forssberg E. Floatability, selectivity and flotation separation of plastics by using a surfactant // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2002, vol. 196, no. 1, pp. 63–70. doi: 10.1016/S0927-7757(01)00706-3
11. Mao Y., Xia W., Heng Y., Xie G. Dynamic pore wetting and its effects on porous particle flotation: A review // *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022, vol. 32, is. 6, pp. 1365–1378. doi: 10.1016/j.ijmst.2022.09.014
12. Yuan Y., Lee T. R. Contact Angle and Wetting Properties // *Surface Science Techniques*. Eds. G. Bracco, B. Holst. Berlin; Heidelberg: Springer, 2013, pp. 3–34. doi: 10.1007/978-3-642-34243-1
13. Абрамзон А. А., Боброва Л. Е., Зайченко Л. П., Измайлова В. Н., Новоженец А. А., Рохленко А. А., Туловская З. Д., Шиц Л. А., Ямпольская Г. П. Поверхностные явления и поверхностно-активные вещества: справочник / под ред. А. А. Абрамзона, Е. Д. Щукина. Л.: Химия, 1984. 392 с.
14. Ковалева А. А., Кулевец П. С., Левданский А. Э., Опимакх Е. В. Экспериментальные исследования краевого угла смачивания полимерных материалов // *Химическая технология и техника: материалы 86-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (Минск, 31 января–12 февраля 2022 г.)* / ред. И. В. Войтов. Минск: БГТУ, 2022. С. 156–158.

References

1. Marine plastic pollution (2021). Available at: https://www.iucn.org/sites/default/files/2022-04/marine_plastic_pollution_issues_brief_nov21.pdf (accessed 05.05.2023).
2. MacLeod M., Arp H. P. H., Tekman M. B., Jahnke A. The global threat from plastic pollution. *Science*, 2021, vol. 373, is. 6550, pp. 61–65. doi: 10.1126/science.abg5433
3. Milbrandt A., Coney K., Badgett A., Beckham G.T. Quantification and evaluation of plastic waste in the United States. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, vol. 183. doi: 10.1016/j.resconrec.2022.106363
4. Levdanskiy A. E., Opimakh E. V., Volnenko A. A., Korганбаев B. N., Zhumadullaev D. K. Flotatsionnoe razdelenie smesi izmel'chenykh polimernykh otkhodov [Flotation separation of a mixture of shredded polymer waste]. Shymkent: Элем Publ., 2020. 152 p.
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. Opimakh E. V., Levdanskiy A. E. Razdelenie smesi izmel'chenykh akrilonitrilbutadienstirola i poliamida metodom flotatsii s ispol'zovaniem v kachestve poverkhnostno-aktivnykh veshchestv sulfanola i sintanola [Separation of a mixture of milled acrylonitrile butadiene styrene and polyamide by flotation using sulfanol and synthanol as surfactants]. *Trudy BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorganicheskikh veshchestv* [Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances], 2013, no. 3 (159), pp. 179–181.
7. Burat F., Güneş A., Kargal M. O. Selective separation of virgin and post-consumer polymers (PET and PVC) by flotation method. *Waste Management*, 2009, vol. 29, no. 6, pp. 1807–1813. doi: 10.1016/j.wasman.2008.12.018
8. Kargal M. O. Selective flotation technique for separation of PET and HDPE used in drinking water bottles. *Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review*, 2010, vol. 31, no. 4, pp. 214–223. doi: 10.1080/08827508.2010.483362
9. Wang C., Wang H., Fu J., Liu Y. Flotation separation of waste plastics for recycling – A review. *Waste Management*, 2015, vol. 41, pp. 28–38. doi: 10.1016/j.wasman.2015.03.027
10. Shen H., Pugh R.J., Forssberg E. Floatability, selectivity and flotation separation of plastics by using a surfactant. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2002, vol. 196, no. 1, pp. 63–70. doi: 10.1016/S0927-7757(01)00706-3
11. Mao Y., Xia W., Heng Y., Xie G. Dynamic pore wetting and its effects on porous particle flotation: A review. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022, vol. 32, is. 6, pp. 1365–1378. doi: 10.1016/j.ijmst.2022.09.014
12. Yuan Y., Lee T. R. Contact Angle and Wetting Properties. *Surface Science Techniques*. Eds. G. Bracco, B. Holst. Berlin; Heidelberg: Springer, 2013, pp. 3–34. doi: 10.1007/978-3-642-34243-1
13. Abramzon A. A., Bobrova L. E., Zaychenko L. P., Izmaylova V. N., Novozhenets A. A., Rokhlenko A. A.,

- Tulovskaya Z. D., Shits L. A., Yampol'skaya G. P. *Poverkhnostnye yavleniya i poverkhnostno-aktivnye veshchestva* [Surface Phenomena and Surfactants]. Eds. A. A. Abramzon, E. D. Shchukin. Leningrad : Khimiya Publ., 1984. 392 p.
14. Kovaleva A. A., Kulevets P. S., Levdanskiy A. E., Opimakh E. V. Eksperimental'nye issledovaniya kraevogo ugla smachivaniya polimernykh materialov [Experimental studies of the boundary wetting angle of polymeric materials]. *Materialy 86 nauchno-tehnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov «Khimicheskaya tekhnologiya i tekhnika»* [Proceedings of the 86th Scientific-Technical Conference of Faculty, Researchers and Postgraduate Students "Chemical Technology and Engineering"]. Minsk : BGTU Publ., 2022, pp. 156–158.
-

Поступила в редакцию 23.06.2023

© А. А. Ковалева, П. С. Кулевцев, А. Э. Левданский, 2023