

УДК 532.6, 622.7

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТОЛКНОВЕНИЯ ЧАСТИЦ С ПУЗЫРЬКОМ ВОЗДУХА

М. Мохаммади, М. Назари, М. Х. Кайхани, Г. Ахмади*

Шахрудский технологический университет, Шахруд, Иран

* Университет Кларксона, 13699-5725 Потсдам, США

E-mails: minamohammadi1220@gmail.com, mnazari@shahroodut.ac.ir,

h_kayhani@shahroodut.ac.ir, gahmadi@clarkson.edu

Представлены результаты экспериментального исследования столкновения частиц пластика диаметром 1,5; 2,0; 2,5 мм с неподвижным пузырьком воздуха диаметром 5,5 мм в деионизированной воде. Установлено, что размер частиц оказывает существенное влияние на скорость частиц и время скольжения их по поверхности пузырька. По мере увеличения диаметра частицы скорость ее скольжения по поверхности пузырька увеличивается, и частица быстро отделяется от нее. Исследовано влияние на процесс столкновения силы сопротивления, капиллярной силы, давления, сил тяжести и плавучести, действующих на частицы. Установлено, что частица остается на поверхности пузырька, в случае если капиллярная сила является доминирующей. Изучено влияние трехфазной контактной линии на капиллярную силу и давление. Для классификации режимов столкновения частицы с пузырьком предложено использовать модифицированное число Бонда.

Ключевые слова: столкновение частиц и пузырьков, скорость скольжения, модифицированное число Бонда, трехфазная контактная линия.

DOI: 10.15372/PMTF20220520

Введение. Пластик — высокофункциональный, дешевый, гигиеничный, легкий и экономичный материал, который используется во многих технологических процессах для замены керамики, дерева и металлов [1]. Отходы таких технологических процессов сжигаются наряду с другими бытовыми отходами, что оказывает разрушительное воздействие на окружающую среду [2]. Для разделения различных пластиковых материалов широко используется простой и высокоэффективный метод флотации [3]. В работе [4] описаны методы переработки пластиковых отходов и способы использования флотации для разделения пластмасс.

В процессе минеральной флотации происходит столкновение частиц пластика с пузырьками воздуха [5]. Механизмы закрепления этих частиц на поверхности пузырька и их отделения от нее изучены недостаточно. Результаты исследования механизмов закрепления (отделения) частиц на (от) поверхности пузырька могут быть использованы при разработке способов разделения пластиковых отходов путем флотации.

Гидрофобное разделение частиц с использованием метода флотации сопровождается тремя процессами: столкновением частиц с пузырьками, закреплением их на поверхностях пузырьков и отделением от них [5]. Столкновение пузырьков с частицами хорошо изучено,

существует несколько моделей этого процесса [6]. Однако процесс присоединения частиц исследован недостаточно вследствие его быстротечности и сложности происходящих при этом химических реакций. Этот процесс сопровождается действием различных сил (сил плавучести и сопротивления, капиллярной силы, давления, силы тяжести), в результате чего происходит деформация пузырьков. Наличие многих факторов, влияющих на процесс присоединения частиц к поверхностям пузырьков, затрудняет теоретическое и экспериментальное исследование этого процесса. На процессы истончения и разрыва тонких жидких пленок, образующихся между пузырьками газа и частицами, влияют химический состав материала частиц, химические реакции растворов, наличие поверхностно-активных веществ и поверхностных сил [7].

Результаты экспериментального исследования процессов столкновения частицы с неподвижным пузырьком в покоящейся жидкости, ее закрепления и отделения от поверхности пузырька представлены в работах [8, 9]. В [10] определен промежуток времени, в течение которого частица удерживается на поверхности пузырька. При этом практически не исследовалось влияние сил взаимодействия пузырька и частицы, а также свойств жидкой пленки на величину этого промежутка времени.

В настоящее время при исследовании процесса соударения частицы с пузырьком воздуха широко используется численное моделирование. В работе [11] выполнено численное моделирование процесса взаимодействия пузырька и частицы в покоящейся жидкости.

В настоящей работе экспериментально изучается флотация полиоксиметиленовых (ПОМ) пластмасс. Для визуализации процесса взаимодействия частиц и пузырьков использовалась высокоскоростная камера. Изучены механизм столкновения частиц с неподвижным пузырьком и соответствующие траектории движения вокруг него частиц различного диаметра при различных значениях высоты, с которой падает частица.

1. Экспериментальная установка. Ниже приводится описание установки и материалов, используемых в экспериментах.

1.1. Используемая аппаратура. Схема экспериментальной установки, состоящей из прозрачной камеры из плексигласа размером $12 \times 12 \times 12$ см, шприцевого насоса, вакуумного насоса, компрессора и высокоскоростной камеры (PCO), приведена на рис. 1.

Рама выполнена из двух пластин из оргстекла, которые соединены четырьмя резьбовыми стержнями длиной 1 м, что позволяет регулировать расстояние между пластинами. На большом деревянном листе, являющемся основанием установки, закрепляются пластины и стержни. Позади экспериментальной камеры установлен источник света. Для создания пузырька воздуха в деионизированной воде используется стеклянная трубка толщиной 1,5 мм и высотой 15 см с внешним диаметром 10 мм. Воздух нагнетается в трубку с помощью шприцевого насоса JMS SP-500 и компрессора Hyundai Silent AC-1550. Для вброса частиц используется вакуумный насос DV-42N-250. Процесс столкновения частиц с пузырьками записывается с помощью высокоскоростной камеры (4500 кадр/с). Разрешение камеры варьируется в диапазоне от 240×16 до 1008×1008 и уменьшается с увеличением скорости изображения.

1.2. Материалы, используемые в экспериментах. В экспериментах использовались частицы ПОМ размером 1,5; 2,0; 2,5 мм. Плотность материала частиц составляет $1,42 \text{ г/см}^3$, статический угол контакта для ПОМ равен $\theta = 71,2^\circ$. Поверхностное натяжение ПОМ в воде и воздухе составляет 26,0 и 44,9 мН/м соответственно. Следует отметить, что ПОМ-смолы широко используются при производстве прецизионных деталей, имеющих стабильные размеры и большой коэффициент скольжения. Полимеры являются альтернативой металлам за счет малых коэффициентов трения и износа и особых механических и химических свойств. Поэтому представляет интерес изучение процесса разделения частиц ПОМ с использованием флотации.

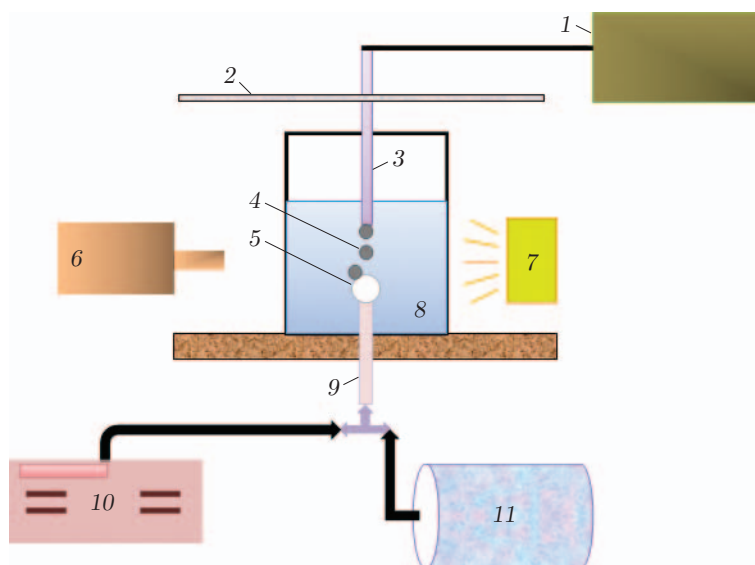


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — вакуумный насос для вброса частиц, 2 — пластина из оргстекла, 3 — трубка с внутренним диаметром 0,5 мм для удержания частиц, 4 — частица, 5 — пузырек воздуха, 6 — высокоскоростная камера PCO, 7 — источник света, 8 — экспериментальная прозрачная камера из плексигласа, 9 — стеклянная трубка, 10 — шприцевый насос, формирующий пузырьки, 11 — компрессор для подачи воздуха

Эксперименты проводились в деионизированной воде комнатной температуры (23 °C). Размер частиц пластика, подвергаемых флотации, как правило, больше размера металлических частиц. Размер металлических частиц находится в диапазоне $30 \div 1000$ мкм, размер частиц пластика обычно составляет несколько миллиметров [12]. Согласно проведенным ранее исследованиям размер частиц пластикового мусора находится в диапазоне $1 \div 6$ мм. Также следует отметить, что конкретный диапазон размеров частиц зависит от конкретного используемого флотационного устройства [12]. Использовались частицы диаметром 1,5; 2,0; 2,5 мм. Частицы таких размеров пригодны для испытаний в прозрачной камере экспериментальной установки. Диаметр пузырьков, с которыми происходили столкновения частиц, составлял 5,5 мм.

Как отмечалось выше, разделение материалов методом флотации включает три стадии: столкновение частицы с пузырьком, закрепление частицы на его поверхности и отделение частицы от пузырька. На стадии столкновения частица ударяется о поверхность пузырька. На стадии присоединения жидкая пленка между пузырьком и частицей разрывается и образуется трехфазная контактная линия (ТФКЛ) — контактная линия между частицами, газовой и жидкой фазами. По мере увеличения числа частиц, закрепившихся на поверхности пузырька, эффективность процесса разделения увеличивается. Если силы, стремящиеся оторвать частицы от пузырька, превышают силы притяжения, частицы будут отделяться от поверхности пузырька и процесс разделения не завершится.

1.3. Генерация пузырьков. Для создания пузырька воздуха использовался безмасляный бесшумный компрессор Hyundai AC-1550 (Китай), расположенный в деионизированной воде на конце стеклянной трубки. Мощность двигателя компрессора составляет 1,1 кВт, объем — 50 л. Двигатель создает давление, равное $8 \cdot 10^5$ Па, расход жидкости составляет 216 л/мин. Для управления расходом воздуха на выходе из компрессора установлен шаровый кран. Когда давление воздуха на входе в стеклянную трубку достигает определенного значения, клапан компрессора закрывается, а оставшийся воздух с высокой точностью по-

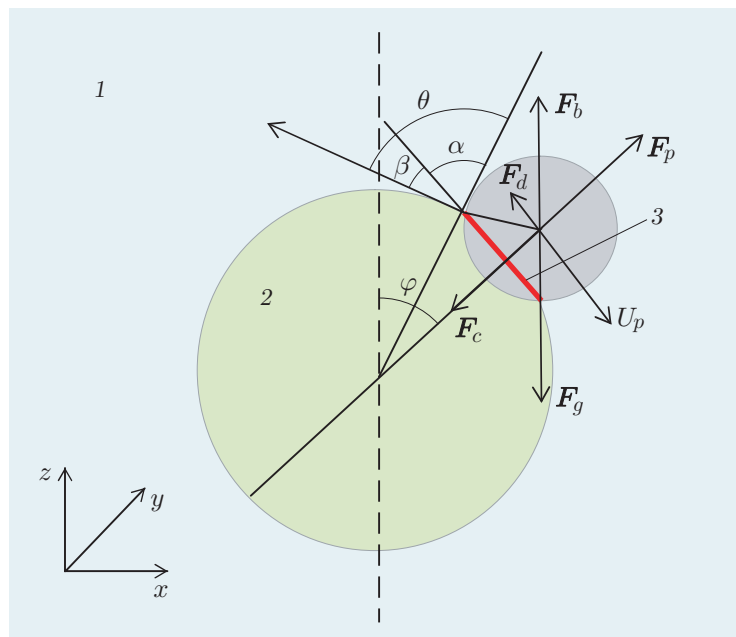


Рис. 2. Силы, действующие на частицу при ее столкновении с пузырьком:
1 — вода, 2 — пузырек воздуха, 3 — ТФКЛ

дается в стеклянную трубку через шприцевый насос. Пузырек образуется на верхнем конце стеклянной трубки. По мере подачи воздуха компрессором пузырек постепенно увеличивается, до тех пор пока не будет достигнут требуемый диаметр. Затем клапан компрессора закрывается, а с помощью шприцевого насоса воздух нагнетается в трубку со скоростью 9 мл/ч. Таким образом, с помощью компрессора и шприцевого насоса можно создать пузырек нужного размера.

В экспериментальной установке используется также трубка, позволяющая вбрасывать частицы с соответствующей высоты. Трубка напрямую соединена гибким шлангом с вакуумным насосом и имеет вращающуюся поверхность. Конец трубки имеет форму сопла для удержания частиц различного размера. При запуске вакуумного насоса частицы фиксируются на конце удерживающей трубки.

В нижней части камеры установлена стеклянная трубка длиной 3 см, конец которой соединен с трехходовым клапаном, используемым для подключения компрессора и шприцевого насоса. Таким образом, расход воздуха от компрессора или шприцевого насоса можно регулировать через трехходовый клапан. В тот момент, когда в верхней части стеклянной трубки формируется устойчивый пузырек, вакуумный насос отключается и начинается движение частицы.

2. Математическое моделирование сил, действующих при столкновении частицы с пузырьком. Силы, действующие на частицу при ее столкновении с пузырьком, показаны на рис. 2 (F_g — сила тяжести, F_b — сила плавучести, F_d — сила сопротивления, F_c — капиллярная сила, F_p — давление).

Сила тяжести, действующая на частицу диаметром D_p и плотностью ρ_p в отрицательном направлении оси z , вычисляется по формуле

$$F_g = D_p^3 / (6\pi\rho_p g).$$

Сила плавучести в жидкости плотностью ρ_l , действующая на частицу в положительном направлении оси z , равна

$$F_b = D_p^3 / (6\pi\rho_l g).$$

Сила сопротивления, возникающая вследствие скольжения частицы по поверхности пузырька, вычисляется следующим образом [5, 8]:

$$(F_m)_d = -f^t(F_S)_d,$$

$$(F_S)_d = \begin{cases} -6\pi\mu R_p U_p, & \text{Re}_p < 1, \\ -6\pi\mu R_p U_p(1 + 0,15 \text{Re}_p^{0,687}), & 1 < \text{Re}_p < 1000; \end{cases}$$

$$f^t = 1,106 + \frac{x}{1,501 + x}, \quad x = \frac{h - R_p}{R_p}, \quad (1)$$

где f^t — гидродинамическая функция сопротивления для твердой сферы, движущейся в непосредственной близости от подвижной газожидкостной границы раздела [5]; μ — динамическая вязкость; R_p — радиус частицы; U_p — скорость частицы; h — расстояние от центра частицы до поверхности пузырька; Re_p — число Рейнольдса. В формуле (1) учтено, что радиус кривизны пузырька сопоставим с радиусом частицы.

При соприкосновении частицы с пузырьком на границе раздела образуется ТФКЛ. С учетом геометрических параметров, показанных на рис. 2, выражение для силы поверхностного натяжения можно представить в виде [13]

$$F_c = \pi D_p \sigma (\sin \alpha \sin (\theta - \alpha)); \quad (2)$$

$$(F_c)_x = 2\pi\sigma \frac{R_{\text{ТФКЛ}}^2}{R_b} \sin (\varphi + \pi), \quad (F_c)_y = 2\pi\sigma \frac{R_{\text{ТФКЛ}}^2}{R_b} \cos (\varphi + \pi),$$

где R_b — радиус пузырька; α — угол полузаполнения; σ — поверхностное натяжение; φ — полярный угол; $R_{\text{ТФКЛ}}$ — радиус ТФКЛ. Значение $R_{\text{ТФКЛ}}$ при столкновении частицы с пузырьком можно измерить с помощью высокоскоростной фотосъемки. Вследствие наличия поверхностного натяжения давление в пузырьке больше давления в окружающей жидкости. Эффективное давление, действующее на площадке контакта твердого тела с газом, вычисляется по формуле [13]

$$F_p = \pi R_p^2 \sin^2(\alpha K), \quad K = 2\sigma/R_b - \rho_l g R_b(1 - \sin \varphi), \quad (3)$$

где $R_b(1 - \sin \varphi)$ — расстояние от вершины пузыря до центра ТФКЛ. Компоненты силы F_p (3) вычисляются по формулам

$$(F_p)_x = \pi R_p^2 \sin^2(\alpha K) \cos \varphi, \quad (F_p)_y = \pi R_p^2 \sin^2(\alpha K) \sin \varphi.$$

При обработке экспериментальных данных использовались безразмерные числа Рейнольдса и Бонда

$$\text{Re}_p = U_p D_p \rho_l / \mu; \quad (4)$$

$$\text{Bo} = (\rho_l - \rho_g) D_b^2 g / \sigma$$

(ρ_g — плотность воздуха; D_b — диаметр пузырька). Число Бонда представляет собой отношение силы тяжести к поверхностному натяжению, а число Рейнольдса — отношение силы инерции к силе, обусловленной наличием вязкости. Сила сопротивления зависит от числа Рейнольдса для частицы. Согласно формуле (4) число Рейнольдса Re_p пропорционально скорости скольжения частицы. Число Бонда характеризует степень закрепления частицы на поверхности пузырька и отделения от нее.

В данной работе для анализа погрешностей использовался статистический метод доверительного интервала. Каждое испытание проводилось не менее трех раз. Доверительный интервал λ вычисляется по формуле

$$\lambda = \bar{x} \pm B\eta/\sqrt{n},$$



Рис. 3. Движение частицы по поверхности пузырька воздуха ($D_p = 1,5$ мм, $D_b = 5,5$ мм, $\sigma = 71 \cdot 10^{-3}$ Н/м, $Bo = 4,255$)

где $\bar{x}$, η , n — среднее арифметическое, стандартное отклонение и количество экспериментов; B — обобщенный коэффициент. Параметр B выбирается с учетом количества экспериментов и требуемой точности расчета.

3. Результаты исследования и их обсуждение. Ниже приводятся результаты анализа полученных экспериментальных данных.

3.1. Положение частицы в процессе ее соударения с пузырьком. Процесс выброса частиц, столкновения их с пузырьком и скольжения по его поверхности показан на рис. 3. Положение частиц фиксировалось высокоскоростной камерой. В качестве начала координат был выбран центр пузырька воздуха. Пузырек, образующийся на конце стеклянной трубки, не является абсолютно круглым вследствие действия поверхностного натяжения. В проведенных экспериментах, так же как и в эксперименте [14], поверхность пузырька была неподвижной. Скорость съемки равна 1500 кадр/с, временной интервал между двумя кадрами составлял 0,6 мкс, разрешение каждого изображения — 1008×1008 . Частицы диаметром 1,5; 2,0; 2,5 мм вбрасывались на различном расстоянии от пузырька H . Например, в случае $H = 10$ мм время с момента вброса частиц диаметром 1,5; 2,0; 2,5 мм из удерживающей трубки до момента их полного отделения от поверхности пузырька составляло 336, 272, 224 мкс соответственно. Общее количество записанных камерой кадров для этих частиц в указанные выше промежутки времени равно 504, 408 и 336 соответственно.

Экспериментально определенные положения частицы (расстояние от центра частицы до поверхности пузырька) в случае ее вброса на расстоянии $H = 10$ мм показаны на рис. 4. Диаметр пузырька равен 5,5 мм.

Исследовались три режима движения частиц вокруг пузырька. Первый режим (режим свободного падения) возникает до момента столкновения частицы с поверхностью пузырька воздуха. Второй режим — начальная стадия контакта частицы с поверхностью пузырька. Когда частица и пузырек находятся в контакте, между ними образуется тонкий слой воды (жидкая пленка). При движении частицы по поверхности пузырька воздуха происходит истончение жидкой пленки. Третий режим начинается в тот момент, когда присутствие гидрофобной частицы вызывает расширение ТФКЛ, в результате чего расстояния между центрами пузырьков и частиц быстро меняются. При образовании устойчивой ТФКЛ частица движется таким образом, что расстояние между центрами пузырька и частицы остается практически постоянным. Аналогичный процесс наблюдался в эксперименте, описанном в работе [15]. В третьем режиме тонкая пленка воды между частицей и пузырьком разрывается, образуется ТФКЛ и возникает контакт между частицей и пузырьком. На рис. 4 представлена зависимость от времени расстояния от центра частицы до поверхности пузырька. Увеличение диаметра частицы приводит к уменьшению времени ее скольжения по поверхности пузырька. Из зависимостей, приведенных на рис. 4, следует, что время скольжения частиц диаметром 1,5; 2,0; 2,5 мм по поверхности пузырька составляет 100, 84, 64 мкс соответственно.

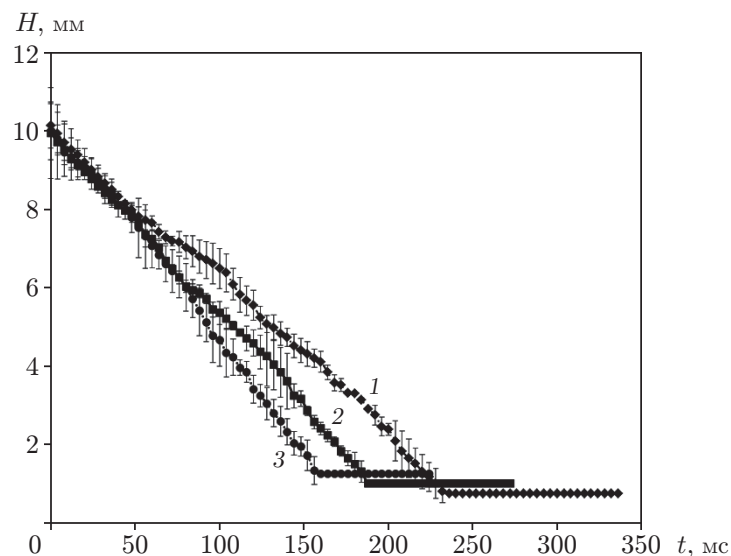


Рис. 4. Зависимость от времени расстояния от центра частицы до поверхности пузырька для частиц различного диаметра:
 1 — $D_p = 1,5$ мм, 2 — $D_p = 2,0$ мм, 3 — $D_p = 2,5$ мм

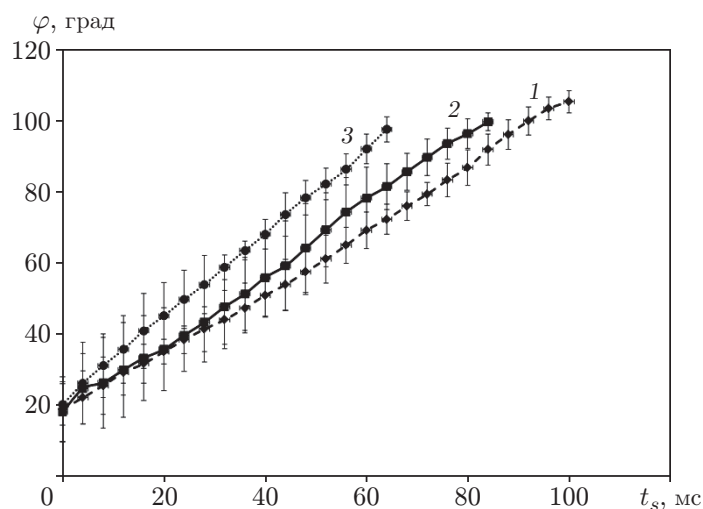


Рис. 5. Зависимость полярного угла φ для частиц различного диаметра от времени скольжения частицы по поверхности пузырька t_s :
 1 — $D_p = 1,5$ мм, 2 — $D_p = 2,0$ мм, 3 — $D_p = 2,5$ мм

Положение частицы на поверхности пузырька определяется полярным углом φ и называется полярным положением частицы. На рис. 5 приведены экспериментальные зависимости полярного положения частиц на поверхности пузырька от времени. На рис. 4 время отсчитывается с момента вброса частицы, на рис. 5 — с момента столкновения частицы с пузырьком.

Для частиц диаметром 1,5; 2,0; 2,5 мм значения угла, при которых происходит столкновение частицы с пузырьком, равны $\varphi = 18,80; 18,11; 20,11^\circ$ соответственно. Расстояние, на котором происходит вброс частиц, составляет $H = 10$ мм. Начальный угол, при котором происходит столкновение частицы с пузырьком, незначительно зависит от диаметра падающих частиц. При увеличении диаметра частицы уменьшается время ее скольжения

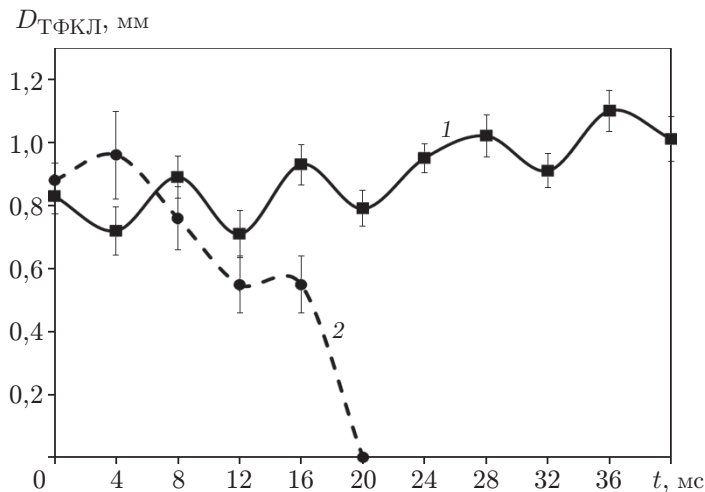


Рис. 6. Зависимости диаметра ТФКЛ от времени в процессе прикрепления частицы к поверхности пузырька (1) и в процессе ее отделения (2) при $D_p = 1,5$ мм

по поверхности пузырька, что обусловлено инерционными эффектами. Для частиц диаметром 1,5; 2,0 мм значения угла, при которых частица отрывается от поверхности пузырька диаметром 5,5 мм, равны $\varphi = 105,32; 99,67^\circ$ соответственно.

В случае если частица является гидрофобной, происходит разрыв жидкой пленки и расширение ТФКЛ. Для гидрофильной частицы в процессе столкновения не происходит разрыва жидкой пленки. Для гидрофобных частиц силы, действующие на частицу и пузырек, удерживают частицу на поверхности пузырька, и для разрыва жидкой пленки требуется очень малое время. После разрыва жидкой пленки частица прикрепляется к пузырьку.

На рис. 6 представлена зависимость диаметра ТФКЛ от времени. Область контакта частицы с поверхностью пузырька представляет собой круг. Перед каждым экспериментом, который повторялся три раза, камера записывала индекс фотографии. Полученные изображения анализировались с использованием кода MATLAB, который преобразует количество пикселей в заданные единицы для ТФКЛ и радиального положения частицы.

В процессе столкновения частицы с пузырьком диаметр ТФКЛ быстро меняется вследствие совместного действия сил, способствующих и препятствующих присоединению частицы. При столкновении частицы с поверхностью пузырька взаимодействие сил, способствующих и препятствующих присоединению, вызывает колебания частицы. В случае отсутствия полного контакта при столкновении частица отделяется от поверхности пузырька. В проведенных экспериментах наблюдались случаи как закрепления частицы, так и ее отделения. Согласно экспериментальным данным [15] при столкновении частицы с пузырьком с большой скоростью поверхность пузырька существенно деформируется, в результате чего частица отделяется от него. При столкновении частицы с пузырьком с небольшой скоростью частица прикрепляется к пузырьку, а затем скользит по его поверхности. В данном случае деформация поверхности пузырька незначительная, при этом возникает ТФКЛ и происходит взаимодействие сил, способствующих и препятствующих присоединению частицы.

Из зависимостей, приведенных на рис. 6, следует, что для частиц диаметром 1,5 мм диаметр ТФКЛ меняется в диапазоне $0,8 \div 1,2$ мм. Для частиц диаметром 2,0; 2,5 мм диаметры ТФКЛ находятся в диапазоне $1,2 \div 1,5$ мм и $1,3 \div 1,6$ мм соответственно. В режиме присоединения зависимость диаметра ТФКЛ от времени имеет осциллирующий характер.

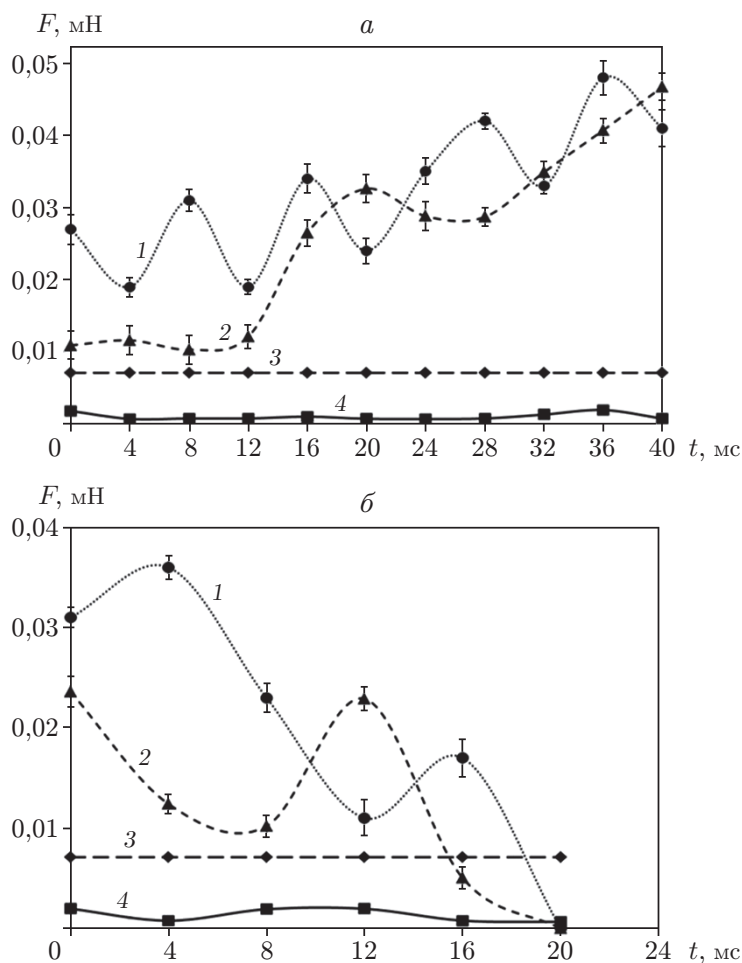


Рис. 7. Зависимости от времени сил, действующих на частицу, в процессе ее прикрепления к поверхности пузырька (а) и в процессе ее отделения (б) при $D_p = 1,5$ мм:

1 — капиллярная сила, 2 — давление, 3 — силы тяжести и плавучести, 4 — сила сопротивления

На рис. 6 показан также случай полного отделения частицы от поверхности пузырька с большим ускорением, в случае когда диаметр ТФКЛ уменьшается до нуля.

3.2. *Силы взаимодействия частицы с пузырьком.* Исследуем силы, действующие на частицу при ее столкновении с пузырьком. В процессе прикрепления частиц сила сопротивления почти постоянна (рис. 7), поскольку зависит от скорости и диаметра частиц. Так как скорость частиц мала, сила сопротивления меньше других сил. Кроме того, для частицы с заданным диаметром разность сил плавучести и тяжести постоянна. Как капиллярная сила, так и давление являются осциллирующими и доминирующими в процессе столкновения. Согласно уравнениям (2), (3) капиллярная сила и давление зависят от размера частиц и радиуса ТФКЛ, поэтому по мере увеличения диаметра частицы радиус ТФКЛ увеличивается, при этом капиллярная сила и давление также увеличиваются. При отделении частиц радиус ТФКЛ уменьшается. Если радиус ТФКЛ стремится к нулю, то капиллярная сила и давление также стремятся к нулю. Это означает, что частица отделилась от поверхности пузырька. При прикреплении частицы капиллярная сила является доминирующей, при ее отделении силы сопротивления, плавучести и тяжести оказывают влияние на движение частицы до того момента, когда она полностью отделится.

Одной из основных проблем горнодобывающей промышленности является обеспечение эффективной флотации крупных частиц. Эффективность флотации повышается при увеличении числа частиц, прикрепленных к пузырькам воздуха. Отделение частиц происходит в том случае, если силы, способствующие отделению, превышают силы, способствующие прикреплению [13]. Поэтому модифицированное число Бонда, являющееся отношением сил, действующих на частицу и способствующих ее отделению, к силам, способствующим прикреплению частицы, может использоваться в качестве критерия отделения частицы:

$$Bo^* = |\mathbf{F}_g + \mathbf{F}_b + \mathbf{F}_d + \mathbf{F}_p|_{F_c} / |\mathbf{F}_c|. \quad (5)$$

При взаимодействии пузырька с частицами капиллярная сила является определяющей. Если капиллярная сила меньше сил, способствующих отделению частицы, то частица отделяется. При описании процесса отделения используется модифицированное число Бонда Bo^* , определенное как отношение суммы сил, способствующих отделению частицы, к силе, способствующей ее прикреплению [13].

Число Бонда Bo является безразмерным (отношение силы тяжести к капиллярной силе). Модифицированное число Бонда $Bo^* = 1$ характеризует устойчивость системы частица — пузырек. При $Bo^* < 1$ сумма сил, способствующих отрыву частицы от пузырька, меньше суммы сил, способствующих ее присоединению, поэтому частицы остаются прикрепленными к пузырьку. При $Bo^* > 1$ сумма сил, способствующих отрыву частицы от пузырька, больше суммы сил, способствующих присоединению, поэтому частица отрывается от пузырька.

Для определения характера движения частицы по поверхности стационарного пузырька предложен силовой критерий, в формулировку которого входят сила тяжести, сила плавучести, капиллярная сила, давление и сила сопротивления. Согласно уравнению (5) сумма силы тяжести, силы плавучести, давления и силы сопротивления уравновешивается капиллярной силой. Направления сил, находящихся в числителе соотношения (5), различны. В числителе (5) указана проекция суммы векторов на направление вектора $\mathbf{F}_c$. Эта проекция является силой, стремящейся отделить частицу от поверхности пузырька. Соотношение между силой отрыва и капиллярной силой определяет поведение частицы на поверхности пузырька. Необходимо выяснить, каким образом силы, действующие на частицу, изменяются в случае ее закрепления на поверхности пузырька и в случае отделения от нее (см. рис. 7). Из зависимостей, приведенных на рис. 7, следует, что при закреплении частицы на поверхности пузырька доминирующими являются капиллярная сила и давление. На рис. 8 показаны зависимости числа Бонда от времени в случае закрепления частицы на поверхности пузырька и в случае ее отделения. Из этих зависимостей следует, что в случае закрепления частицы число Бонда меньше единицы. Как отмечено выше, при малых значениях числа Бонда ($Bo^* < 1$) частица остается на поверхности пузырька. На рис. 8 видно, что в конце фазы закрепления частицы на поверхности пузырька и в начале фазы отрыва число Бонда становится больше единицы. Это свидетельствует о том, что силы отрыва становятся равными силе поверхностного натяжения и частица практически отрывается от поверхности пузырька. При отрыве частица постепенно выходит за пределы пузырька, что приводит к уменьшению площади соприкосновения частицы с пузырьком и, следовательно, к уменьшению величины давления (см. рис. 6). В случае отрыва число Бонда увеличивается (см. рис. 8). Когда радиус ТФКЛ равен нулю, капиллярная сила также равна нулю. В этом случае модифицированное число Бонда бесконечно. При скольжении частицы по поверхности пузырька меняется соотношение между давлением и капиллярной силой, вследствие чего меняется диаметр ТФКЛ. В результате возникает осциллирующее движение частицы.

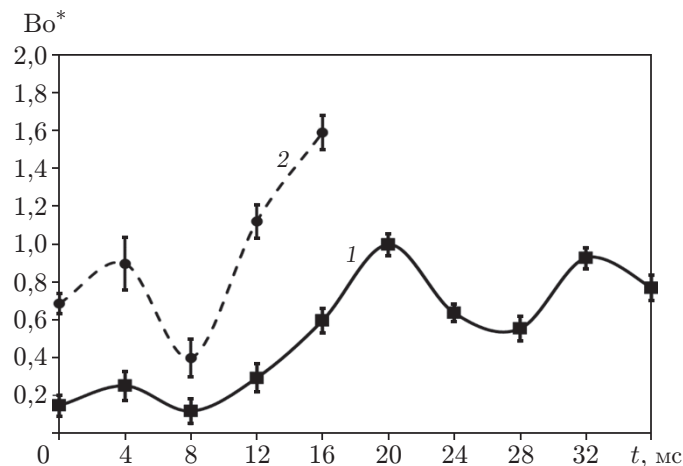


Рис. 8. Зависимость модифицированного числа Бонда от времени в случае прикрепления частицы к поверхности пузырька (1) и в случае ее отделения (2) при $D_p = 1,5$ мм

Закключение. Проведено экспериментальное исследование процесса столкновения частиц полиоксиметилена с неподвижным пузырьком воздуха. В экспериментах использовались частицы пластика различного диаметра и пузырек диаметром 5,5 мм. Получены следующие результаты.

Начальные углы столкновения с пузырьком частиц диаметром 1,5; 2,0; 2,5 мм составляют 18,80; 18,11; 20,11° соответственно. С увеличением диаметра частицы увеличивается сила инерции, в результате чего частица быстрее отделяется от поверхности пузырька. На полярное положение частиц на поверхности пузырька существенно влияет расстояние от точки вброса частицы до точки ее столкновения с пузырьком. По мере увеличения этого расстояния начальный угол столкновения уменьшается.

Установлено, что по мере увеличения диаметра частицы размер трехфазной контактной линии увеличивается. Для частиц диаметром 1,5 мм диаметр трехфазной контактной линии меняется в интервале от 0,6 до 1,2 мм, а для частиц диаметром 2,0 и 2,5 мм диаметр трехфазной контактной линии меняется в интервалах 1,2 ÷ 1,5 мм и 1,3 ÷ 1,6 мм соответственно.

Для анализа процессов прикрепления частицы к поверхности пузырька и отделения от него введено модифицированное число Бонда. В случае прикрепления частицы к пузырьку модифицированное число Бонда находится в интервале 0,1 ÷ 1,0. Это условие может быть использовано в технологии извлечения полезных ископаемых методом флотации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Derraik J. G.** The pollution of the marine environment by plastic debris: a review // *Marine Pollut. Bull.* 2002. V. 44, N 9. P. 842–852. DOI: 10.1016/S0025-326X(02)00220-5.
2. **Subramanian P. M.** Plastics recycling and waste management in the US // *Resources, Conservat. Recycling.* 2000. V. 28, N 3/4. P. 253–263. DOI: 10.1016/S0921-3449(99)00049-X.
3. **Pita F., Castilho A.** Separation of plastics by froth flotation. The role of size, shape and density of the particles // *Waste Management.* 2017. V. 60. P. 91–99. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.07.041.
4. **Shent H., Pugh R. J., Forssberg E. A.** Review of plastics waste recycling and the flotation of plastics // *Resources, Conservat. Recycling.* 1999. V. 25, N 2. P. 85–109. DOI: 10.1016/S0921-3449(98)00017-2.

5. **Nguyen A. V., Evans G. M.** Attachment interaction between air bubbles and particles in froth flotation // Experiment. Thermal Fluid Sci. 2004. V. 28, N 5. P. 381–385. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2002.12.001.
6. **Basařová P., Machoň V., Hubička M., Horn D.** Collision processes involving a single rising bubble and a larger stationary spherical particle // Intern. J. Mineral Process. 2010. V. 94. P. 58–66. DOI: 10.1016/j.minpro.2009.11.004.
7. **Yoon R. H.** The role of hydrodynamic and surface forces in bubble-particle interaction // Intern. J. Mineral Process. 2000. V. 58, N 1–4. P. 129–143. DOI: 10.1016/S0301-7516(99)00071-X.
8. **Nguyen A. V., Evans G. M.** Movement of fine particles on an air bubble surface studied using high-speed video microscopy // J. Colloid Interface Sci. 2004. V. 273, N 1. P. 271–277. DOI: 10.1016/j.jcis.2003.12.066.
9. **Verrelli D. I., Koh P. T., Nguyen A. V.** Particle-bubble interaction and attachment in flotation // Chem. Engng Sci. 2011. V. 66, N 23. P. 5910–5921. DOI: 10.1016/j.ces.2011.08.016.
10. **Albijanac B., Ozdemir O., Nguyen A. V., Bradshaw D.** A review of induction and attachment times of wetting thin films between air bubbles and particles and its relevance in the separation of particles by flotation // Adv. Colloid Interface Sci. 2010. V. 159, N 1. P. 1–21. DOI: 10.1016/j.cis.2010.04.003.
11. **Gao Y., Wang G., Evans G. M., et al.** Modelling the motion of a collected particle over a bubble surface // Proc. Engng. 2015. V. 102. P. 1346–1355. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.266.
12. **Wang C. Q., Wang H., Fu J. G., Liu Y. N.** Flotation separation of waste plastics for recycling: A review // Waste management. 2015. V. 41. P. 28–38. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.03.02.
13. **Wang G., Gao Y., Mitra S., et al.** Instantaneous bond number for a particle detaching from a bubble // Intern. J. Mineral Process. 2015. V. 142. P. 22–29. DOI: 10.1016/j.minpro.2015.03.012.
14. **Firouzi M., Nguyen A. V., Hashemabadi S. H.** The effect of microhydrodynamics on bubble-particle collision interaction // Minerals Engng. 2011. V. 24, N 9. P. 973–986. DOI: 10.1016/j.mineng.2011.04.005.
15. **Schulze H. J.** Hydrodynamics of bubble-mineral particle collisions // Mineral Process. Extract. Metallurgy Rev. 1989. V. 5, N 1–4. P. 43–76. DOI: 10.1080/08827508908952644.

*Поступила в редакцию 8/X 2021 г.,
после доработки — 26/I 2022 г.
Принята к публикации 28/II 2022 г.*
