

С.О. ФЕДОСЕЕВА, инж.,
(Украина, Луганск, «УкрНИИУглеобогащение»)

Е.И. НАЗИМКО, д-р техн. наук,
(Украина, Донецк, Донецкий Национальный Технический Университет),

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ЭМУЛЬГИРОВАНИЯ АПОЛЯРНЫХ СОБИРАТЕЛЕЙ ПРИ ФЛОТАЦИИ УГЛЕСОДЕРЖАЩИХ ШЛАМОВ

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Последние десятилетия имеет место тенденция постоянного ухудшения качества рядовых углей при увеличении в них выхода мелких и тонких частиц. При низкой эффективности флотации тонкие угольные частицы попадают в камерный продукт и уносятся в илонакопители и отстойники. Зольность продуктов в этих техногенных месторождениях колеблется в пределах 45-75% [1]. Находящиеся в них миллионы тонн горючей массы могут использоваться в хозяйстве Украины, так как добыча данного сырья не связана со значительными капитальными затратами. Кроме того, илонакопители занимают значительные площади на пахотных землях (около 1.5 млн. м²), дренаж жидкой фазы, содержащей вредные вещества, через дно отстойника ведет к загрязнению водоносных слоев, с поверхности эксплуатируемых отстойников происходит испарение реагентов и их продуктов в атмосферу, высохшие илонакопители загрязняют воздушный бассейн. Это приводит к ухудшению экологической обстановки и свидетельствует о необходимости увеличения селективности обогащения вообще и обработки тонких классов углей, в частности.

Ряд исследователей в зарубежных странах (США, ЮАР, Канада, Германия, Россия) ведут работы в направлении повышения эффективности флотационного обогащения путем создания нового оборудования, реагентных режимов и совершенствования схем обогащения.

Анализ исследований и публикаций. При флотации углей наиболее широко применяются аполярные реагенты, эффективность действия которых значительно повышается предварительным эмульгированием [2, 3]. Это обеспечивает более полный контакт нерастворимого в воде реагента с твердой поверхностью частиц, что создает условия для повышения ее гидрофобности. Тонкое диспергирование увеличивает площадь поверхностей, которые находятся в контакте друг с другом, повышает скорость физико-химических процессов во флотационной пульпе и эффективность использования реагентов. Однако, как установлено ранними исследованиями, слишком маленький размер капель эмульсии приводит к неоправданно высокому расходу собирателя из-за его поглощения пористой поверхностью угольных частиц [4].

Поэтому установление количественных соотношений между параметрами процесса и размером получаемых капель эмульсии является актуальным и имеет большое прикладное значение [5].

Постановка задачи. Цель работы - анализ процесса эмульгирования

аполярных собирателей для повышения извлечения труднофлотируемых частиц и эффективности обогащения углеродсодержащих материалов.

Изложение материала и результаты. Различные исследователи связывают экспериментальные данные диспергирования взаимно нерастворимых жидкостей эмпирическими формулами, полученными на основании допущения о справедливости закона «2/3» Колмогорова-Обухова для технологических аппаратов [6]. Обычно эти зависимости представляются в следующем виде:

$$d_{cp} = K_1 \sigma^{0,6} \delta_c^{-0,2} \varepsilon^{-0,4}, \quad d_{cp} = K_2 We^{0,6} D_m. \quad (1)$$

Здесь d_{cp} – средний диаметр капель эмульсии, K_1 и K_2 – эмпирические коэффициенты, σ – поверхностное натяжение на границе раздела фаз, δ_c – плотность среды, ε – скорость диссипации энергии в единице объема смеси, We – критерий Вебера для мешалок, D_m – диаметр мешалки.

К недостаткам зависимостей (1) относят наличие эмпирических коэффициентов, которые связаны с конструкцией аппаратов, вязкостью жидкостей и изменяются в широких пределах. Кроме того, допущение об однородности и изотропности турбулентности, являющееся необходимым условием для применения закона о «2/3» справедливо только в зонах, удаленных от стенок и вращающихся частей мешалок. При этом известно, что диспергирование жидкости происходит у стенок аппаратов и в зоне вращения мешалки, т.к. именно здесь градиент скорости потока и скорость диссипации энергии имеют максимальные значения [7].

В потоках, имеющих градиент скорости, происходит вытягивание капли жидкости в эллипсоид и последующий его разрыв. Для каждого потока существует критический размер такой капли. Капля может быть вытянута настолько, что поверхность возникшего эллипсоида превысит суммарную площадь поверхности двух капель, объемы которых вдвое меньше. В соответствии с принципами термодинамики произойдет разрыв эллипсоида на две капли, как показано на рис. 1.

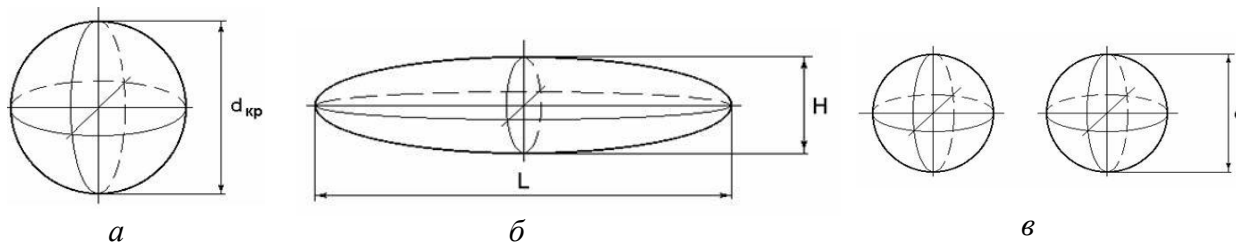


Рис. 1. Разрыв капли аполярной жидкости в потоке воды, имеющем градиент скорости: *а* – капля критического размера, *б* – эллипсоид перед разрывом, *в* – капли, образовавшиеся при разрыве

Устойчивыми в данном потоке будут капли с размером $d < d_{кр}$, т.к. в этом случае деформация будет недостаточной для выполнения указанного выше условия.

Из равенства объемов и площадей поверхностей эллипсоида и вновь образованных капель могут быть получены соотношения между их геометрическими параметрами:

$$d = 1,238 H = 0,326 L = 0,794 d_{кр}. \quad (2)$$

По гипотезе В.Г. Левича разрыв капли происходит за счет внутреннего динамического напора, возникающего от обтекания капли жидкостью. Для потока с постоянным градиентом скорости распределение скоростей внутри и за пределами диспергируемой фазы было установлено теоретически и подтверждено экспериментально [8, 9]. В соответствии с полученными уравнениями относительная скорость внутри сферы максимальна на поверхности раздела фаз в полюсе, лежащем в центральном сечении, перпендикулярном направлению потока. Именно в этой плоскости происходит разрыв капли аполярного реагента.

Приняв допущение, что деформация эллипсоида не влияет на распределение скоростей в данном сечении, получим максимальную скорость V_{max} для жидкости внутри капли:

$$V_{max} = 0,5G \cdot H \cdot [(p + 2) / (p + 1)] = G \cdot H \cdot K, \quad (3)$$

где G - градиент скорости внешнего потока; p - отношение коэффициентов динамической вязкости диспергируемой фазы и среды; K - коэффициент, учитывающий вязкость взаимодействующих систем.

В точке, где индуцируется максимальная скорость диспергируемой фазы, возникает динамическое давление P_δ , определяемое по соотношению:

$$P_\delta = 0,5 \delta_\phi \cdot V_{max}^2, \quad (4)$$

где δ_ϕ - плотность диспергируемой фазы, V_{max} - максимальная скорость жидкости внутри диспергируемой фазы.

Капиллярное давление в полюсе эллипсоида, где жидкость капли имеет максимальную скорость, в соответствии с первым законом капиллярности с учетом выражений (2) определяется по соотношению:

$$P_\kappa = \sigma [(1/R_1) + (1/R_2)] = 2\sigma (L^2 + H^2) / HL^2, \quad (5)$$

где R_1, R_2 – главные радиусы кривизны поверхности.

Условие дробления капли критического размера запишется в виде баланса динамического и капиллярного давления. С учетом уравнений (4) и (5) можно получить:

$$\delta_\phi \cdot G^2 \cdot H^2 \cdot K^2 / 2 = 2 \cdot \sigma \cdot (L^2 + H^2) / H \cdot L^2 \quad (6)$$

В реальных условиях потока с постоянным градиентом скорости

практически отсутствуют за исключением области вязкого подслоя, образующегося при турбулентном течении вдоль гладкой твердой поверхности и имеющего толщину h_δ [9]:

$$h_\delta \approx 5 \cdot \nu_c / V_o, \quad (7)$$

где ν_c - кинематическая вязкость среды; V_o - динамическая скорость потока.

Для этого подслоя градиент скорости равен:

$$G = V_o^2 / \nu_c. \quad (8)$$

В остальной части потока изменение скорости не пропорционально расстоянию от стенки и градиент, вызывающий деформацию капли, может быть определен приблизительно. Учитывая, что его значение будет максимальным в случае касания капель стенки, получим:

$$G \approx V(H) / H. \quad (9)$$

Экспериментальная проверка найденных зависимостей выполнена на лабораторной установке, которая позволяла производить диспергирование несмешивающихся с водой углеводородных аполярных жидкостей потоком воды. Рабочая зона установки представляла собой стеклянную трубку длиной 0,4м и диаметром 4мм. Данная форма реактора выбрана в связи с тем, что для гладких труб известны достаточно точные зависимости распределения скоростей по сечению при ламинарном и турбулентном потоках [10]. При выполнении экспериментов использовалась модифицированная методика [11]. Размеры капель эмульсии, определяемые экспериментально, сравнивались с расчетными размерами, полученными с учетом соотношений (2), (6) и (9) и распределения скоростей у твердой стенки [10] при условии $H > h_\delta$, по формуле:

$$0.2d\delta_\phi K^2 V_o^2 \sigma^{-1} \{2,564 \ln[1 + 0,39 ((0,8dV_o - 7,8\nu_c) / \nu_c)] + 7,8\}^2 = 1, \quad (10)$$

где коэффициенты 2,564, 0,39 и 7,8 приняты по данным работы [11].

На рис. 2 приведены результаты экспериментов и расчетов по формуле (10). Цифрой 1 и сплошной линией помечены экспериментальные данные, а цифрой 2 и пунктирной линией – полученные расчетным путем по соотношению (10).

Из представленных данных следует, что расчетные данные соответствуют экспериментальным в широком интервале изменения скоростей потока для различных углеводородных жидкостей при условии отсутствия коалесценции капель эмульсии.

При увеличении скорости потока воды с 1 до 3м/с размер капель эмульсии снижается во всех случаях. Аналитическая зависимость диаметра капель

эмульсии от скорости потока воды имеет вид гиперболы для исследованных углеводородов с высокой степенью аппроксимации (таблица).

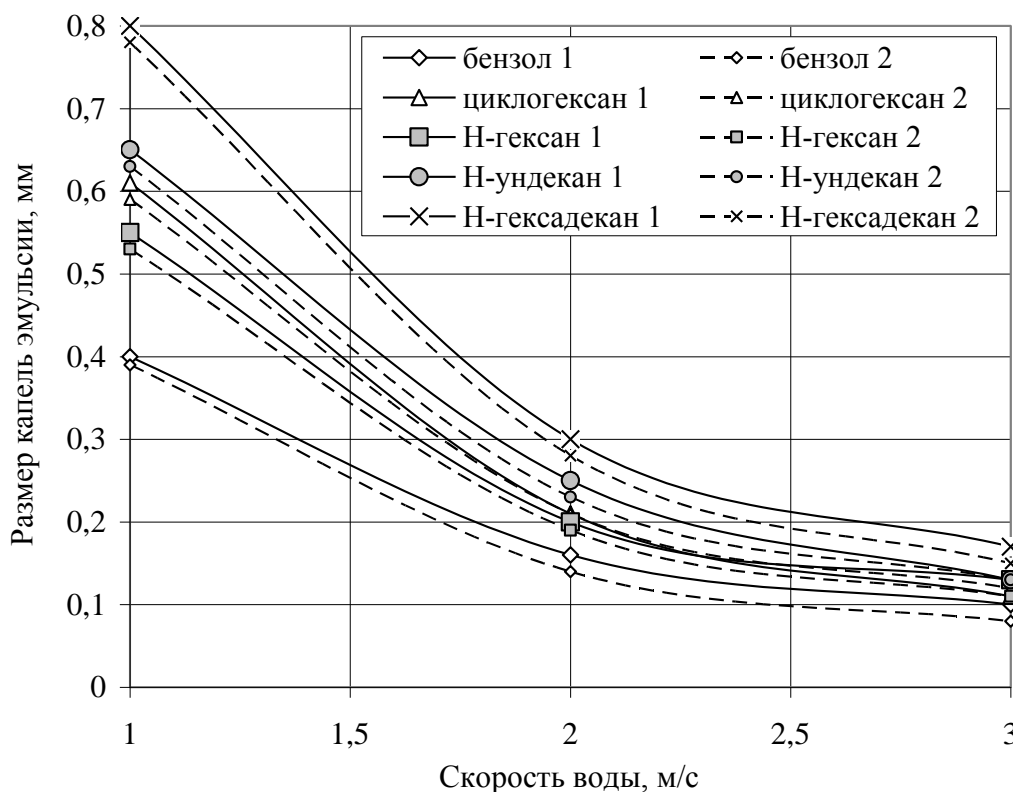


Рис. 2. Размер капель эмульсии различных углеводородных жидкостей, полученный экспериментальным и расчетным путем

При этом наиболее значительное снижение наблюдается для Н-гексадекана – с 0,8 до 0,17мм. При высокой скорости потока (3м/с) все исследованные углеводородные жидкости имеют размер капель эмульсии, изменяющийся в небольших пределах: от 0,1 до 0,17мм.

Из всех исследованных жидкостей наименьший размер капель эмульсии получен при эмульгировании бензола: от 0,1 до 0,4мм, наибольший – при эмульгировании Н-гексадекана: от 0,17 до 0,8мм в зависимости от скорости потока воды.

Таблица

№№	Диспергируемая фаза	Аналитическая зависимость	Параметр аппроксимации, R^2
1	Бензол	$d = 0,396 V^{1,268}$	0,9989
2	Циклогексан	$d = 0,612 V^{1,557}$	0,9999
3	Н-гексан	$d = 0,5367 V^{1,3287}$	0,9999
4	Н-ундекан	$d = 0,6594 V^{1,4557}$	0,9982
5	Н-гексадекан	$d = 0,7993 V^{1,41}$	0,9999

Выводы и направления дальнейших исследований. Проведенные аналитические и экспериментальные исследования позволили установить условия дробления капли критического размера и зависимость крупности капель эмульсии от скорости потока воды.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на определение количественной оценки влияния свойств аполярных собирателей на процесс эмульгирования и флотационного обогащения углесодержащих трудно флотируемых шламов.

Список литературы

1. Розробка комплексної технології вилучення вторинного палива з шламових відходів вуглезбагачення: Звіт про НДР. – Луганськ: Укрндівуглезбагачення, 2007 – 236 с.
2. **Глембоцкий В.А.** Об оценке дисперсности эмульсий углеводородов в воде при флотации с применением аполярных реагентов / В.А. Глембоцкий, М.Р. Василевич, А.А. Кузнецова // Обогащение руд. – Иркутск. – 1984. – С. 74-82.
3. **Федосеева С.О.** Разработка и испытание способов эмульгирования реагентов при флотации углей / С.О. Федосеева, О.А. Морозов, Л.А. Морозова и др. // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2011. – вип. 45(86). – С. 119-127.
4. **Классен В.И.** Флотация углей / В.И. Классен. – М.: Недра, 1963. – 480 с.
5. **Самойлов А.И.** О взаимодействии аполярных реагентов–собирателей с самородной серой / А.И. Самойлов // Обогащение полезных ископаемых. – Киев. – Техніка. – 1981. – вып. 28. – С. 64-66.
6. **Стренк Ф.** Перемешивание и аппараты с мешалками / Ф. Стренк – Л.: Химия. – 1975. – 384с.
7. **Mc Manamey W.J.** Saunter mean and maximum drop diameters of liquid-liquid dispersions in turbulent, agitated vessels at low dispersed phase hold-up / W.J. Mc Manamey // Chemical Engineering Science.- 1979. – **34**. – N3. – p. 432-434.
8. **Rumscheidt F.D.** Deformation and burst of fluid drops in shear and hyperbolic flow / F.D. Rumscheidt, S.G. Mason // Journal of Colloid Science. – 1961. – **16**. - N3, p. 238 - 261.
9. **Левич В.Г.** Физико-химическая гидродинамика / В.Г. Левич - М.: Физматгиз, 1959. - 700 с.
10. **Миллионщиков М.Д.** Основные закономерности турбулентного течения в пристеночных слоях / М.Д. Миллионщиков // Атомная энергия. – 1970. - т. 28. - С.317 - 320.
11. **Попов В.Ф.** Оценка величины межфазной поверхности и затрат энергии при эмульгировании жидкостей в трубчатом реакторе / В.Ф. Попов, Н.В. Виноградова // Химическая промышленность. – 1984. - N 5. - С. 49-51.

*Рукопись поступила в редколлегию 20.02.12
Рекомендована к опубликованию д.т.н. Полуляхом А.Д.*