

С.О. ФЕДОСЕЕВА

(Украина, Луганск, "Укрниииуглеобогащение"),

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 апо-

лярных собирателей для повышения извлечения труднофлотируемых частиц и эффективности обогащения углесодержащих 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.

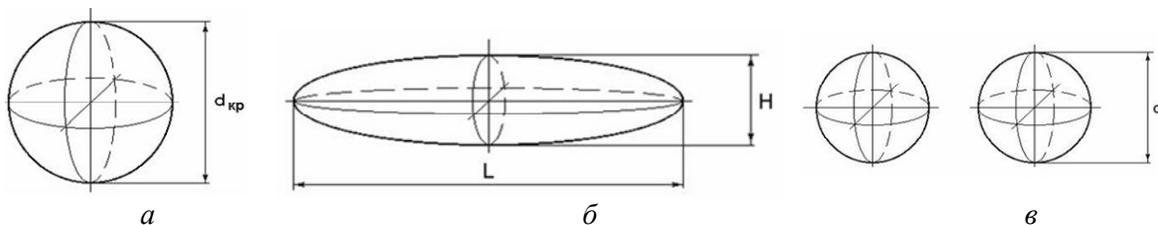


Рис. 1. Разрыв капли аполярной жидкости в потоке воды, имеющем градиент скорости:
a – капля критического размера; *б* – эллипсоид перед разрывом;
в – капли, образовавшиеся при разрыве

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

Флотация

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_d , определяемое по соотношению:

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

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:

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

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 потоки с постоянным градиентом скорости практи-

чески отсутствуют за исключением области вязкого подслоя, образующегося при турбулентном течении вдоль гладкой твердой поверхности и имеющего толщину h_6 [9]:

$$h_6 \approx 5 \cdot \nu_c / V_0, \quad (7)$$

где ν_c – кинематическая вязкость среды; V_0 – динамическая скорость потока.

Для этого подслоя градиент скорости равен:

$$G = V_0^2 / \nu_c. \quad (8)$$

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 не смешивающихся с водой углеводородных аполярных жидкостей потоком воды. Рабочая зона установки представляла собой стеклянную трубку длиной 0,4 м и диаметром 4 мм. 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 $H > h_6$, по формуле:

$$0,2d\delta_\phi K^2 V_0^2 \sigma^{-1} \{2,564 \ln[1 + 0,39 ((0,8dV_0 - 7,8\nu_c) / \nu_c)] + 7,8\}^2 = 1, \quad (10)$$

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 3 м/с размер капель эмульсии снижается во всех случаях. Аналитическая зависимость диаметра капель эмульсии от скорости потока воды имеет вид гиперболы для исследованных углево-

Флотація

дородов с высокой степенью аппроксимации (таблица).

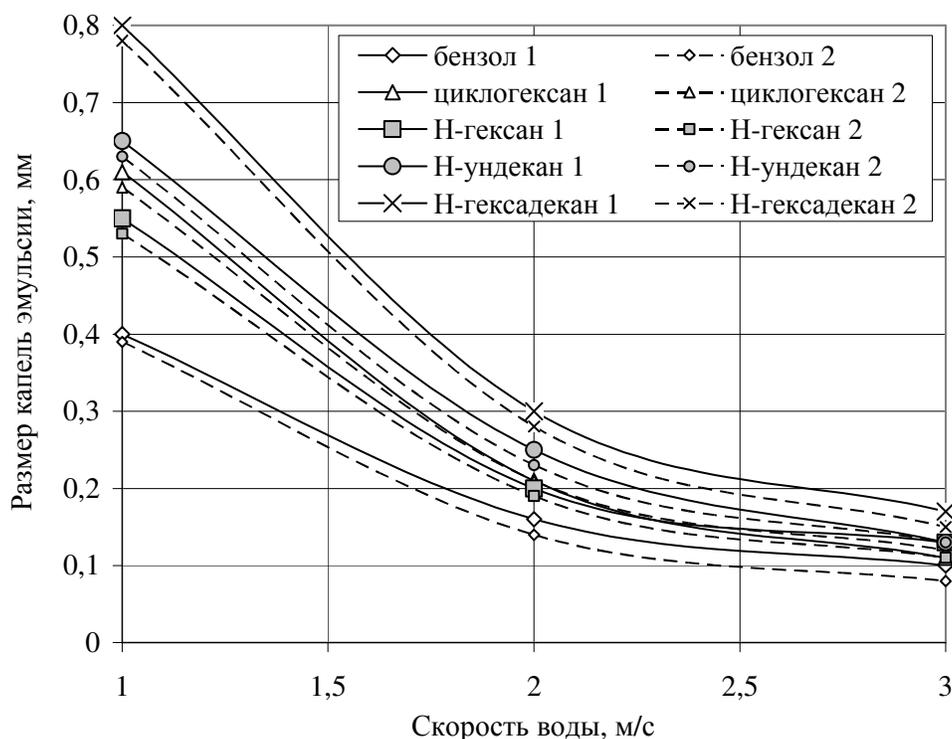


Рис. 2. Размер капель емульсії різних углеводородних рідин, отриманий експериментальним і розрахунковим шляхом

При цьому найбільш значуще зменшення спостерігається для Н-гексадекана – з 0,8 до 0,17 мм. При високій швидкості потоку (3 м/с) всі досліджувані углеводородні рідини мають розмір крапель емульсії, що змінюється в невеликих межах: від 0,1 до 0,17 мм.

З усіх досліджуваних рідин найменший розмір крапель емульсії отримано при емульгуванні бензолу: від 0,1 до 0,4 мм, найбільший – при емульгуванні Н-гексадекана: від 0,17 до 0,8 мм в залежності від швидкості потоку води.

№	Диспергувана фаза	Аналитична залежність	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

Висновки і напрямки подальших досліджень. Проведені аналітичні та експериментальні дослідження дозволили встановити умови дроблення крапель критичного розміру та залежність крупності крапель емульсії від швидкості потоку води.

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., Василевич М.Р., Кузнецова А.А. Об оценке дисперсности эмульсий углеводородов в воде при флотации с применением аполярных реагентов // Обогащение руд. – 1984. – С. 74-82.
3. 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. – 2011. – Вип. 45(86). – С. 119-127.
4. Классен В.И. Флотація углей. – М.: Недра, 1963. – 480 с.
5. Самойлов А.И. О взаимодействии аполярных реагентов–собирателей с самородной серой // Обогащение полезных ископаемых. – 1981. – Вып. 28. – С. 64-66.
6. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками. – Л.: Химия, 1975. – 384 с.
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 // Chemical Engineering Science. – 1979. – 34, №3. – P. 432-434.
8. Rumscheidt F.D., Mason S.G. Deformation and burst of fluid drops in shear and hyperbolic flow // Journal of Colloid Science. – 1961. – 16, №3. – P. 238-261.
9. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. – М.: Физматгиз, 1959. – 700 с.
10. Миллионщиков М.Д. Основные закономерности турбулентного течения в пристеночных слоях // Атомная энергия. – 1970. – Т. 28. – С. 317-320.
11. Попов В.Ф., Виноградова Н.В. Оценка величины межфазной поверхности и затрат энергии при эмульгировании жидкостей в трубчатом реакторе // Химическая промышленность. – 1984. – № 5. – С. 49-51.

© Федосеева С.О., Назимко Е.И., 2012

*Надійшла до редколегії 18.03.2012 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. О.Д. Полуляхом*