

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛОТНОСТИ ТОКА И ПРОВОДИМОСТИ ЖИДКОЙ ФАЗЫ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ПУЗЫРЬКОВ В ЭЛЕКТРОФЛОТАЦИОННОЙ КОЛОННЕ

© 2019 г. Надия Хаджлауи^а, Иссам Ксентини^{б, *}, Мариам Котти^а, Лассаад Бен Мансур^а

^аЛаборатория прикладной жидкостной механики, Факультет технологии производств и экологических наук Сфакса, Сфаксе, Тунис

^бМеждународный институт технологии, Североамериканский частный университет, Сфакс, Тунис

*e-mail: issam.ksentini@iit.ens.tn

Поступила в редакцию 26.04.2017 г.

После доработки 18.09.2017 г.

Принята к публикации 18.09.2017 г.

Электрофлотационные колонны предпочтительны во многих химических, электрохимических и биохимических процессах обработки сточных вод благодаря их простоте в проектировании, эксплуатации и обслуживании. Очень важно иметь инструментарий для определения и оптимизации распределения размеров пузырьков, формирующихся внутри этих колонн. В этой связи и для улучшения характеристик электрофлотационной обработки сточных вод основная цель настоящего исследования заключалась в изучении влияния плотности тока и проводимости жидкой фазы на распределение размеров пузырьков и режима потока пузырьков. Для этого использовали прямоугольную электрофлотационную колонну. Для определения диаметра и скорости подъема пузырьков использовали метод регистрации и анализа видеоизображений.

Ключевые слова: электрофлотация, электропроводность, анализ изображений, пузырьки, сточные воды, плотность тока

DOI: 10.1134/S0424857019040029

ВВЕДЕНИЕ

По мере усиления требований к экологичности требуются новые и новаторские технологии для эффективной обработки сточных вод различных предприятий с относительно низкими эксплуатационными расходами. Очистка и дезинфекция воды при помощи прямых или комплексных электрохимических технологий считаются очень перспективной альтернативной технологией благодаря значительному улучшению материала электродов и применению низкокзатратных, обновляемых источников энергии [1].

Применение электрохимических технологий обработки сточных вод – тема нескольких книг и авторитетных обзоров [2]. Наблюдается все больший интерес исследователей к обработке различных типов сточных вод: после обработки металлов, полупроводникового производства [3], окрашивания тканей [4, 5], предочистки после дубильного производства, нефтепроизводства [6], удаление мышьяка и фосфата из сточных вод и удаление органики из сточных вод птицебоен [7]. В последние несколько декад множество ис-

следователей изучали гидродинамику пузырьковых колонн. Одна из основных причин концентрации на гидродинамике – ее сильное влияние на эффективность работы пузырьковой колонны [8, 9].

Пузырьковые колонны часто применяют в качестве многофазного оборудования, где диспергированная фаза (газ) вводится в стационарную непрерывную фазу (жидкость) [10]. Они были широко исследованы благодаря их все более частому применению при загромождении шлама при обработке сточных вод [11]. Пузырьки могут формироваться разными методами, например, при флотации растворенного воздуха, электроокислении [12], распылении воздуха в электростатическом поле или электрофлотации [13–15].

Электрофлотационный процесс – это электрохимическая версия традиционного процесса флотации: формирование мелких пузырьков кислорода и водорода при электролизе сточных вод:

Окисление на аноде: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}^+ + \text{O}_2 \uparrow + 4\text{e}^-$

Восстановление на катоде: $4\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2 \uparrow + 4\text{OH}^-$

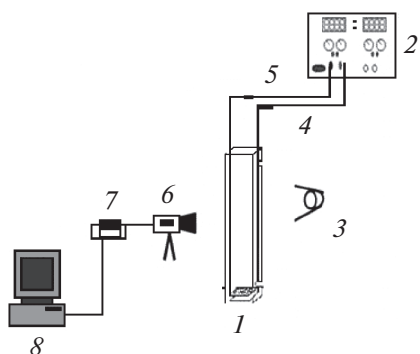


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – электрофлотационная ячейка; 2 – источник постоянного тока; 3 – галогеновая лампа; 4 – катод; 5 – анод; 6 – цифровая камера; 7 – плата сбора данных; 8 – компьютер.

Исследования показали, как рабочие параметры, такие как плотность тока и физические свойства жидкости, влияют на поведение пузырьков, возникающих в электрофлотационном процессе при обработке сточных вод [16].

Как правило, подсчет пузырьков в технологии или микробиологии осуществляли визуально при помощи оптического микроскопа. Однако новые технологии позволяют обработать информацию при помощи специального программного обеспечения [17]. Цифровая камера и компьютер – единственные устройства, необходимые для сбора требуемой гидродинамической информации (скорость пузырьков и распределение размеров пузырьков) [18, 19].

В этой работе представлено экспериментальное исследование с применением прямоугольной электрофлотационной колонны и системы видеорегистрации для изучения влияния плотности тока и проводимости жидкой фазы на скорость пузырьков и распределение размеров пузырьков.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Оборудование

Эксперименты проводили в прямоугольной электрофлотационной колонне, изготовленной из плексигласа, для осуществления визуального наблюдения и видеорегистрации пузырьков. Ее размер составлял $5.8 \times 6.7 \times 71.5$ см, как показано на рис. 1. Электрофлотационная ячейка была оборудована нерастворимым анодом и катодом из нержавеющей стали, помещенными на дне ячейки. Электрический ток накладывали при помощи стабилизированного источника тока с выпрямителем постоянного тока (DC Power GPC-M Series GW-INSTEK-TAIWAN).

Расстояние между анодом и катодом поддерживали равным 5 мм для минимизации омических потерь. Катод был просверлен и помещен сверху. Отверстия позволяют проходить сквозь катод пузырькам, возникающим на аноде.

Для каждого исследования электрофлотационную ячейку заполняли раствором электролита. Модельные водные растворы готовили путем добавления соли (NaCl) к осмотической воде в различных концентрациях (5, 10, 15, 20, 25 и 30 г/л) для повышения электропроводности. Проводимость измеряли при помощи кондуктометра Consort C531. Плотность раствора измеряли с применением пикнометров, вязкость определяли при помощи капиллярных вискозиметров. Эти свойства приведены в табл. 1. Все эксперименты проводили при комнатной температуре и обычном давлении в пакетном режиме.

В качестве оборудования для определения размера пузырьков и скорости пузырьков при помощи анализа изображений использовали цифровую видеокамеру с микродетализацией (модель NV-A3E, Panasonic, Япония), плату сбора данных (модель Pinnacle PCTV PRO, версия 4.02, Fujitsu Siemens) с программой анализа цифровых изображений (Adobe Photoshop, версия 7.0) и галогеновую лампу мощностью 700 Вт.

Таблица 1. Свойства жидкостей

Жидкая фаза	Проводимость, мСм/см	Вязкость $\times 10^3$, Па с	Плотность, кг/м ³
Осмотическая вода	0.6	1.602	999
Минерализованная вода (5 г/л)	7.6	1.626	1001
Минерализованная вода (10 г/л)	15.2	1.673	1005
Минерализованная вода (15 г/л)	21.5	1.699	1009
Минерализованная вода (20 г/л)	27	1.718	1015
Минерализованная вода (25 г/л)	31.5	1.753	1020
Минерализованная вода (30 г/л)	35	1.792	1025

Определение распределения размеров пузырьков

Для определения среднего диаметра пузырьков, а также распределения размеров пузырьков для каждого набора рабочих условий регистрировали изображения потока пузырьков при помощи аналоговой видеокамеры при каждом сочетании экспериментальных условий. Регистрировали проволоку известного диаметра (0.149 мм) для калибровки размеров пузырьков. Затем создавали видеофайл с заданным числом кадров в секунду. Извлекали все видеоизображения. Затем применяли набор фильтров, для получения четких изображений пузырьков.

Для получения достаточно репрезентативных размеров пузырьков и распределения размеров пузырьков обычно для каждого сочетания экспериментальных условий определяли размеры по меньшей мере 100 пузырьков. Шафер и др. [20] показали, что можно получить изображения в хорошем качестве при освещении пузырьков диффузной фоновой подсветкой. Пузырьки выглядят темными на белом фоне.

Измерение скорости пузырьков

Скорость подъема пузырьков можно оценить путем измерения смещения пузырьков между двумя смещенными изображениями за заданное время.

$$U_B = \frac{\Delta H}{t}, \tag{1}$$

где ΔH – путь пузырька за время t . Фактически регистрировали группы отдельных пузырьков и регистрировали их подъем.

Затем изображения обрабатывали и сравнивали для расчета скорости подъема пузырьков.

Число Рейнольдса

Исторически классические методы, применяемые при характеристике режимов течения пузырьков в пузырьковых колоннах, заключались в анализе значения числа Рейнольдса (Re). Таким образом, число Рейнольдса использовали как ключевой параметр при анализе режима течения пузырьков, вне зависимости от того, был ли он однородным, переходным или неоднородным. Граница однородного режима, как правило, определяется как $Re = 1$ [21].

$$Re = \frac{\rho_L U_B d_B}{\mu_L}, \tag{2}$$

где μ_L – вязкость жидкости, а ρ_L – плотность жидкости.

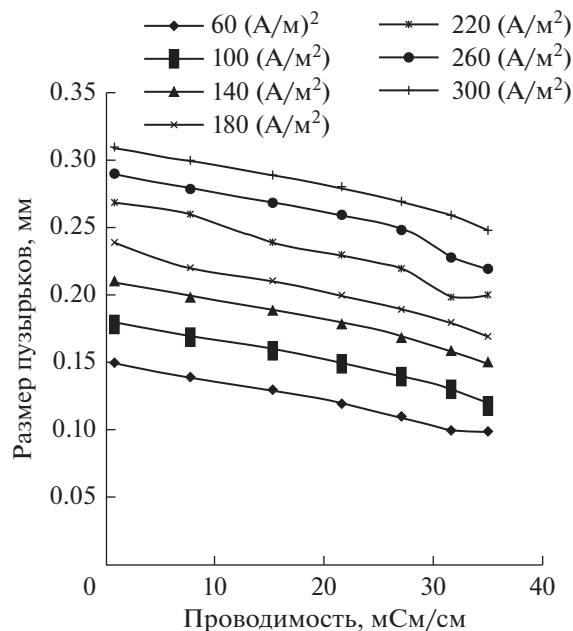


Рис. 2. Влияние проводимости жидкой фазы на размер пузырьков при различных плотностях тока.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки влияния плотности тока и проводимости жидкой фазы на размер пузырьков и их распределение, а также скорость их подъема осуществляли опыты при переменной плотности тока (от 60 до 300 А/м²). При этом проводимость жидкой фазы меняли от 0.6 до 35 мСм/см путем добавления к осмотической воде хлорида натрия (NaCl) в различных концентрациях.

Влияние проводимости жидкой фазы и плотности тока на средний размер пузырьков

Зависимость размера пузырьков от плотности тока и проводимости образцов солевых растворов представлена на рис. 2. Этот рисунок иллюстрирует влияние проводимости жидкой фазы: размер пузырьков в солевом растворе был меньше, чем в осмотических образцах.

Отмечено, что влияние раствора электролита на размер пузырьков напрямую связано с ионной силой раствора электролита: размер пузырьков снижается с ростом ионной силы раствора электролита. С другой стороны, эти результаты показывают, что размер пузырьков возрастает с повышением плотности тока с 60 до 300 А/м².

Влияние проводимости жидкой фазы и плотности тока на скорость пузырьков

В отношении скорости пузырьков было отмечено, что рост плотности тока приводит к более

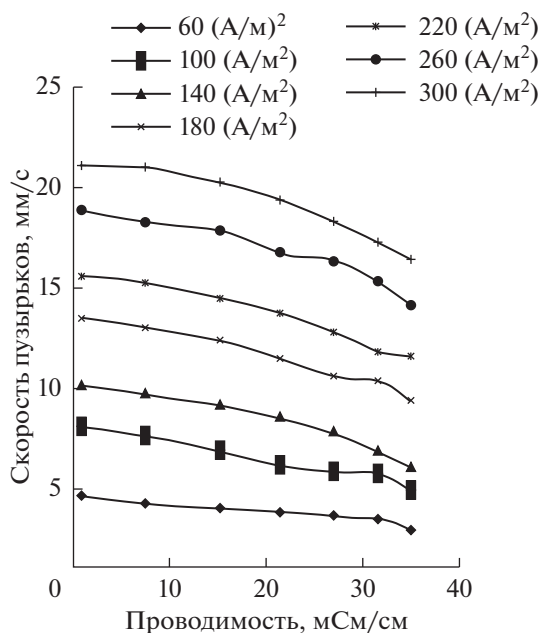


Рис. 3. Влияние проводимости жидкой фазы на скорость пузырьков при различных плотностях тока.

быстрому движению пузырьков. Однако рост проводимости жидкой фазы приводит к снижению скорости пузырьков (рис. 3). Это хорошо согласуется с несколькими опубликованными источниками, где утверждается, что растворы электролитов подавляли слияние пузырьков и замедляли скорость подъема пузырьков [22, 23].

Распределение пузырьков при различных значениях проводимости жидкой фазы

Распределение размеров пузырьков при различных значениях проводимости жидкой фазы

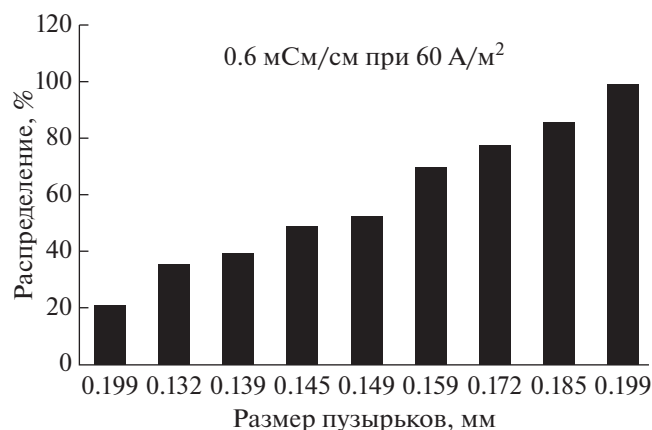


Рис. 4. Кумулятивное распределение размеров в осмотической воде.

представлено на рис. 4–6. Эти данные показывают, что проводимость жидкой фазы заметно влияет на пузырьки среднего размера, но оказывает меньшее влияние на распределение мелких и крупных пузырьков. Распределение размеров пузырьков показывает, что при различных значениях проводимости жидкой фазы (0.6, 21.5 и 35 мСм/см) возникают пузырьки в широком интервале размеров: около 0.15, 0.12 и 0.099 мм, соответственно, при постоянной плотности тока (60 А/м²).

Затем определяли влияние плотности тока на распределение размеров пузырьков при постоянной проводимости жидкой фазы (рис. 4, 7 и 8). Из этих данных видно, что средний размер пузырьков постепенно возрастал с увеличением плотности тока.

Гидродинамические режимы течения пузырьков

Режим течения пузырьков можно анализировать путем расчета числа Рейнольдса по уравнению (2). Значение $Re = 1$ разграничивает различные режимы. На рис. 9 показано изменение рассчитанного для каждого случая числа Рейнольдса в зависимости от прилагаемой к электродам плотности тока.

Отметим, что переход от однородного режима течения пузырьков к неоднородному было отмечено при 100 А/м² в случае образцов с проводимостью менее 7.6 мСм/см, тогда как при достижении неоднородного режима при 140 А/м² электропроводность составляет от 15.2 до 27 мСм/см. При больших значениях проводимости жидкой фазы, т.е. 35 мСм/см, неоднородный режим течения пузырьков достигался при большей плотности тока, 220 А/м².

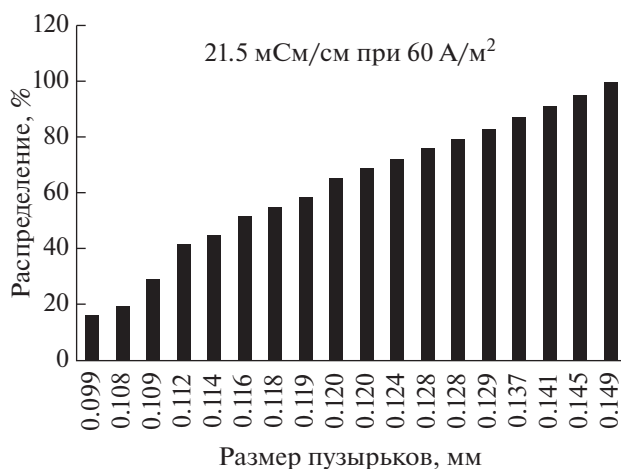


Рис. 5. Кумулятивное распределение размеров в воде с 15 г (NaCl)/л.

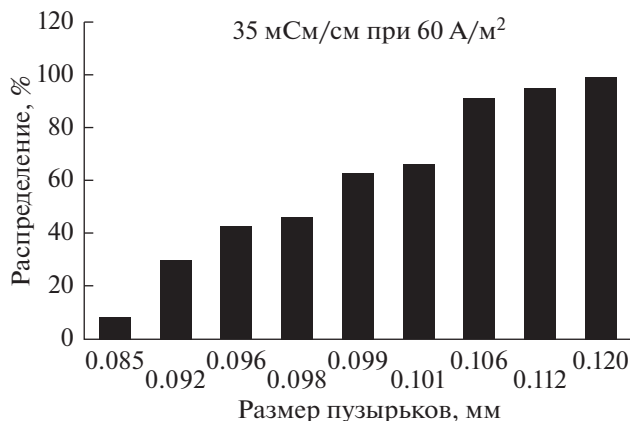


Рис. 6. Кумулятивное распределение размеров в воде с 30 г (NaCl)/л.

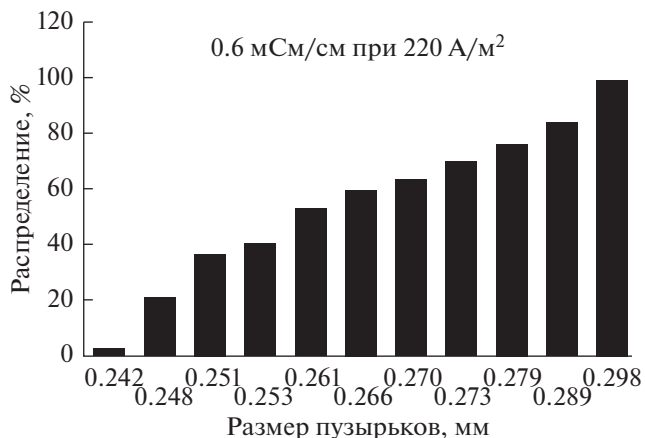


Рис. 7. Кумулятивное распределение размеров в осмотической воде (0.6 мСм/см) при 220 А/м².

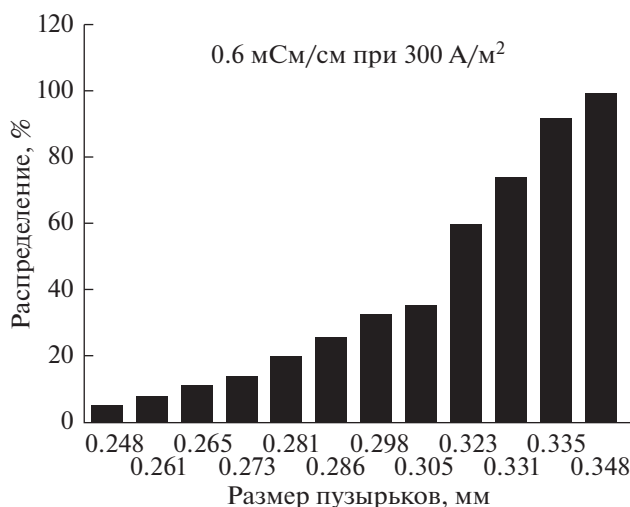


Рис. 8. Кумулятивное распределение размеров в осмотической воде (0.6 мСм/см) при 300 А/м².

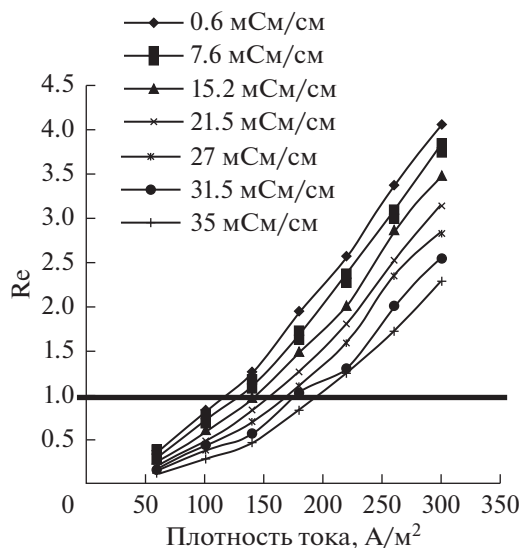


Рис. 9. Влияние плотности тока на число Рейнольдса при различной проводимости жидкой фазы.

Сравнение с другими флотационными технологиями

Эффективность электрофлотации связана, прежде всего, с формированием однородных, мелких пузырьков. Хорошо известно, что эффективность разделения процесса флотации существенно зависит от размера пузырьков [24]. Это связано с тем, что мелкие пузырьки обладают большей площадью размера для фиксации частиц. Изменение плотности тока также позволяет обеспечивать любую концентрацию пузырьков газа во флотационной среде, что приводит к возрастанию вероятности фиксации частиц пузырьками.

Например, при сравнении размера пузырьков в электрофлотационной колонне и газораспределителе можно заключить, что диаметр пузырьков

в газораспределителе больше, чем в случае электрофлотации: от 1 до 8 мм в газораспределителе и от 0.1 до 0.3 мм в электрофлотационных колоннах [25, 26].

Электрофлотация явно обладает преимуществами перед флотацией растворенным воздухом, отстаиванием или принудительной флотацией воздухом. При низкой электропроводности жидкой фазы непосредственное применение электрофлотации приводит к потреблению большого количества электроэнергии. В этом случае проблема решается простым добавлением NaCl.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было экспериментально исследовано влияние проводимости жидкой фазы и плотности тока на

распределение размеров пузырьков в прямоугольной электрофлотационной колонне с использованием системы видеорегистрации. С применением метода обработки видеоизображений был получен удовлетворительный результат для широкого диапазона характеристик пузырьков.

Было отмечено, что при повышении проводимости образцов воды были получены пузырьки меньшего размера. Также большое влияние на скорость пузырьков и распределение размеров пузырьков оказывает проводимость жидкой фазы.

Также был проведен анализ гидродинамических режимов путем расчета чисел Рейнольдса. Мы обнаружили, что как плотность тока, так и проводимость жидкой фазы заметно влияют на переход от однородного к неоднородному режиму течения пузырьков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ghernaout, D., Naceur, M.W., and Aouabed, A., On the dependence of chlorine by-products generated species formation of the electrode material and applied charge during electrochemical water treatment, *Desalination*, 2011, vol. 270, p. 9.
- Ma, L., Sun, C., Ren, J., Wei, H., and Liu, P., Efficient electrochemical incineration of phenol on activated carbon fiber as a new type of particulates, *Russ. J. Electrochem.*, 2014, vol. 50, p. 569.
- Ben Mansour, L., Ben Abdou, Y., and Gabsi, S., Effect of some parameters on removal process of nickel by electroflotation, *Water Env. Res. J.*, 2001, vol. 2, p. 51.
- Merzouk, B., Yakoubi, M., Zongo, I., Leclerc, J.-P., Paternotte, G., Pontvianne, S., and Lapicque, F., Effect of modification of textile wastewater composition on electrocoagulation efficiency, *Desal.*, 2011, vol. 275, p. 181.
- Anissa, A., Ridha, L., and Amor, H., Feasibility evaluation of combined electrocoagulation/adsorption process by optimizing operating parameters removal for textile wastewater treatment, *Desal. Water Treat.*, 2017, vol. 60, p. 78.
- Ben Mansour, L. and Chalbi, S., Removal of oil from oil/water emulsions using electroflotation process, *J. Appl. Electrochem.*, 2006, vol. 36, p. 577.
- Bukhari, Investigation of the electro-coagulation treatment process for the removal of total suspended solids and turbidity from municipal wastewater, *Bioresour. Technol.*, 2008, vol. 99, p. 914.
- Merzouk, B., Yakoubi, M., Zongo, I., Leclerc, J.-P., Paternotte, G., Pontvianne, S., and Lapicque, F., Bubble size measurement in electroflotation, *Miner. Eng.*, 2010, vol. 23, p. 1058.
- Ren, L., Zhang, Y., Qin, W., Bao, S., Wang, P., and Yang, C., Investigation of condition-induced bubble size and distribution in electroflotation using a high-speed camera, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 2014, vol. 24, p. 7.
- Zhu, C., Hu, C., Lu, J., Wang, X., Li, H., and Chen, T., Electrocatalytic degradation of bisphenol a in aqueous solution using β -PbO₂/Ti as anode, *Russ. J. Electrochem.*, 2015, vol. 51, p. 353.
- Zabel, T., Avantages of dissolved air flotation for water treatment, *J. Am. Water Works Assoc.*, 1985, vol. 77, p. 42.
- Jia, B.J., Zhou, J.T., Zhang, A.L. et al., Novel electrochemical heterogeneous catalytic reactor for organic pollutant abatement, *Russ. J. Electrochem.*, 2007, vol. 43, p. 296.
- Kolesnikov, V.A., Varaksin, S.O., and Kryuchkova, L.A., Electroflotation Extraction of Valuable Components from Wash Waters of Electroplating Works, with Water Recycling, *Russ. J. Electrochem.*, 2001, vol. 37, p. 760.
- Kyzas George, Z. and Matis Kostas, A., Electroflotation process: A review, *Journal of Molecular Liquids*, 2016, vol. 220, p. 657.
- Samantha, G.C., Dutra Achilles, J. B., and Monte Marisa, B.M., The influence of some parameters on bubble average diameter in an electroflotation cell by laser diffraction method, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2016, vol. 4, p. 3681.
- Ksentini, I., Kotti, M., and Ben Mansour, L., Effect of liquid phase physicochemical characteristics on hydrodynamics of an electroflotation column, *Desalin. Water Treat.*, 2013, vol. 51, p. 1.
- Lin, B., Recke, B., Knudsen, J.K.H., and Jørgensen, S.B., Bubble size estimation for flotation processes, *Mineral. Eng.*, 2008, vol. 21, p. 539.
- Labbafi, M., Thakur, R.K., Vial, C., and Djelveh, G., Development of an on-line optical method for assment of the bubble size and morphology in aerated food products, *Food Chem.*, 2007, vol. 102, p. 454.
- Ding, Y. G., Lu, X., and Deng, F.L., Numerical Simulation With a CFD-PBM Model of Hydrodynamics and Bubble Size Distribution of a Rectangle Bubble Column, *The American Society of Mechanical Engineers*, 2016, vol. 5, p. 30.
- Schafer, R., Merten, C., and Eigenberger, G., Bubble size distributions in a bubble column reactor under industrial conditions, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2002, vol. 26, p. 595.
- Kendoush, A.A., Mohammed, T.J., and Abid, B.A., Experimental investigation of the hydrodynamic interaction in bubbly tow phase flow, *J. Chem. Eng. and Processing*, 2004, vol. 43, p. 23.
- Malysa, K., Krasowska, M., and Krzan, M., Influence of surface active substances on bubble motion and collision with various interfaces, *Adv. Colloid Interface Sci.*, 2005, vol. 114, p. 205.
- Prakash, A., Margaritis, A., and Li, H., Hydrodynamics and local heat transfer measurements in a bubble column with suspension of yeast, *Biochem. Eng. J.*, 2001, vol. 9, p. 155.
- Sentini, K., Hmidi, K., Hajlaoui, N., and Ben Mansour, L., Hydrodynamic study of an electroflotation column operating in continuous mode, *I.J.I.R.T.*, 2014, vol. 1, p. 109.
- Painmanakul, P., Loubière, K., Hébrarda, G., Peuchot, M. M., and Roustan, M., Effect of surfactants on liquid-side mass transfer coefficients, *Chem. Eng. Sci.*, 2005, vol. 60, p. 6480.
- Issaoui, R., Ksentini, I., Kotti, M., and Ben Mansour, L., Effect of current density and oil concentration on hydrodynamic aspects in electroflotation column during oil/water emulsion treatment, *Water Treat. and Demineral. Technol.*, 2017, vol. 39, p. 166.