

УДК 532.73-1

ПУЗЫРЬКОВЫЙ МЕТОД ОЧИСТКИ ВОДЫ

© 2019 г. Б. М. Смирнов^{1, *}, Н. Ю. Бабаева¹, Г. В. Найдис¹,
В. А. Панов¹, Э. Е. Сон¹, Д. В. Терешонок¹

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

*E-mail: bsmirnov@gmail.com

Поступило в редакцию 28.06.2018 г.

После доработки 18.09.2018 г.

Принято к печати 10.10.2018 г.

Рассмотрен метод очистки воды от примесных молекул пузырьками воздуха, которые образуются на дне сосуда и, всплывая, захватывают молекулы примеси и переносят их на поверхность потока воды, в котором находится примесь. Далее примесные молекулы удаляются с поверхности или уничтожаются на ней под действием поверхностного электрического разряда. Теоретический и экспериментальный анализы демонстрируют реальность данного метода очистки воды. Этот метод не подходит для массовой очистки воды в силу большого числа молекул воздуха, используемых для удаления одной примесной молекулы, однако он удобен при очистке воды от канцерогенных или биологически опасных примесей.

DOI: 10.1134/S0040364419020212

ВВЕДЕНИЕ

Если примесная молекула введена в жидкую воду, имеются два вида взаимодействия этой молекулы с молекулой воды. В первом случае примесная молекула оказывается в связанном состоянии в узле структуры, которая образуется молекулами воды. Переход примесной молекулы в другой узел носит барьерный характер. По сути дела, в этом случае примесные молекулы растворяются в воде. С энергетической точки зрения примесные молекулы образуют химическую связь внутри структуры воды, и переход этих молекул на границу раздела между водой и воздухом энергетически невыгоден.

Другая ситуация имеет место, если примесные молекулы не растворяются в воде. Тогда они выталкиваются из воды на границу раздела, и этот процесс энергетически выгоден. В этом случае происходит самоочищение воды естественным образом [1], т.е. примесь переходит из объема воды на ее поверхность. Такой процесс лежит в основе промышленных методов очистки [2, 3]. Однако самоочищение воды от примесей, находящихся в ее объеме в виде молекул, происходит медленно. Действительно, характерный коэффициент диффузии небольших молекул воды составляет порядка 10^{-5} см²/с [4], так что время перемещения примесных молекул в результате диффузии на расстояния нескольких сантиметров занимает около суток. Соответственно, процесс очистки воды от примесей длительный и требует специальных действий. Например, при очистке

водных резервуаров от попадающей в нее нефти область загрязнения огораживается, чтобы загрязнение не распространялось в горизонтальном направлении, и далее нефть и продукты ее взаимодействия с водой собираются с поверхности. Этот процесс очистки занимает большое время.

Можно ускорить процесс перемещения примесных молекул на поверхность воды, основываясь на характере их взаимодействия в воде и приблизив к ним поверхность раздела. Этого можно достигнуть введением в объем воды пузырьков. Тогда поверхность пузырьков является границей раздела между водой и воздухом, находящимся внутри пузырька, и процесс прилипания примесной молекулы к поверхности пузырька в данном случае является энергетически выгодным [5]. Пузырьки всплывают, перенося примесные молекулы к поверхности раздела. В данной статье проведен анализ этого процесса.

ПРОЦЕССЫ С УЧАСТИЕМ ПУЗЫРЬКОВ В ВОДЕ

Оценим эффективность метода очистки воды от механических и молекулярных примесей, основанного на прохождении парогазовых пузырьков с характерным диаметром 10–100 мкм. Процесс очистки происходит в соответствии со схемой, представленной на рис. 1. Примесные молекулы, сталкивающиеся с пузырьком, остаются на его поверхности, и поскольку пузырек движется к поверхности раздела, в конечном итоге он выносит прилипшие к нему примесные молекулы на поверхность воды. Таким способом происходит

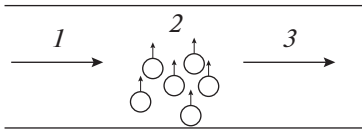


Рис. 1. Схема процесса очистки потока воды с примесями молекулами за счет всплывания пузырьков воздуха: 1 – область протока воды до очистки; 2 – область очистки, где примесные молекулы захватываются всплывающими пузырьками; 3 – область протока воды после обработки.

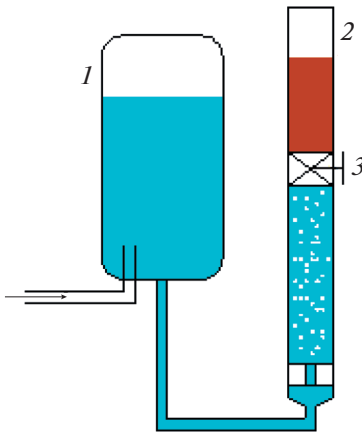


Рис. 2. Общая схема экспериментальной установки: 1 – барботажная колонна; 2 – камера очистки; 3 – запорный кран, разделяющий нижнюю и верхнюю секции камеры очистки.

очистка объема воды от находящихся в нем молекул примеси.

Проведем исследование рассматриваемого режима очистки. Движущей силой этого процесса является всплывание пузырька. В случае падения частицы в газе ее скорость определяется формулой Стокса [6, 7], однако в рассматриваемом случае всплывания пузырька газа в жидкости в формулу Стокса следует добавить множитель $3/2$ [8]. Тогда скорость всплывания пузырька рассчитывается следующим образом:

$$v_r = \frac{4\rho g r^2}{27\eta},$$

где r – радиус пузырька, g – ускорение свободного падения, $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ – плотность воды, $\eta = 8.9 \times 10^{-3} \text{ г/(см с)}$ – вязкость воды. Эту формулу удобно представить в виде

$$v_r = Cr^2, \quad C = 1.6 \times 10^6 \text{ см}^{-1} \text{ с}^{-1}.$$

Выполним простые оценки для рассматриваемого процесса. Число примесных молекул, прилипающих в единицу времени к пузырьку радиусом r , составляет $v_r \pi r^2 N_{ad}$, где N_{ad} – плотность

примесных молекул в области очистки, так что уравнение баланса для этой величины имеет вид

$$dN_{ad}/dt = -v_r \pi r^2 N_{ad} N_b,$$

где N_b – концентрация пузырьков. Введем скорость воды с примесями молекулами v_0 и расстояние L_0 , при прохождении которого потоком плотность примесных молекул в нем уменьшается в e раз. Для простоты будем считать, что все пузырьки имеют сферическую форму и одинаковый радиус r ; вводя относительную часть объема внутри воды c_b , занятого пузырьками, имеем

$$L_0 = \frac{4rv_0}{3c_b v_r}.$$

Выберем типичные параметры для рассматриваемого процесса, взяв $r = 10 \text{ мкм}$, что ведет к скорости всплывания v_r порядка 1 см/с , $c_b = 1\%$, $v_0 \approx 10 \text{ см/с}$, получим для ширины области заметного падения содержания примеси $L_0 = 1 \text{ см}$, что свидетельствует о реальности рассматриваемого метода очистки воды. При этом отметим, что в действительности рассматривается только первая стадия очистки воды, когда примесные молекулы или образуемые из них нано- или микрочастицы перемещаются на поверхность потока воды. Этот процесс происходит в вертикальном направлении в виде волны, причем скорость распространения волны равна скорости всплывания пузырька v_r , а ширина волны в вертикальном направлении составляет $1/(\pi r^2 N_b)$. Соответственно, отношение длины канала, который превышает L_0 , к высоте потока равно отношению скорости протока к скорости всплывания. При этом разделение примеси в потоке происходит в вертикальном направлении.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для качественной демонстрации работоспособности данного метода очистки воды были проведены соответствующие эксперименты. Общая схема экспериментальной установки, более подробно описанная в работе [9], представлена на рис. 2. Микропузырьки воздуха образовывались в воде в результате декомпрессии. Для этого воздух под давлением 7 атм предварительно растворялся в течение 30 мин в барботажной колонне 1, затем вода с растворенным в ней воздухом при том же давлении поступала через цилиндрическое отверстие диаметром 0.4 мм и высотой 10 мм в нижнюю часть нижней секции камеры очистки 2, находящуюся при атмосферном давлении. При этом падала предельная концентрация растворенного в воде газа и в воде образовывалось большое количество воздушных пузырьков диаметром $10\text{--}100 \text{ мкм}$. Анализ размера пузырьков проводился при автоматизированной обработке цифровых



Рис. 3. Изображения столба жидкости с примесью мела до (слева) и после обработки микропузырьками (справа).

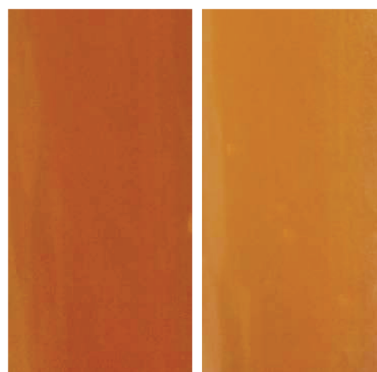


Рис. 4. Изображения столба жидкости с примесью акриловой краски до (слева) и после обработки микропузырьками (справа).

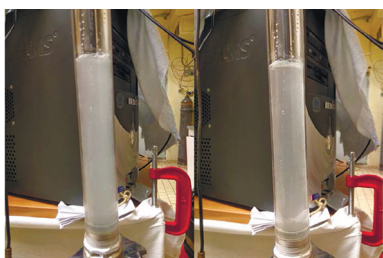


Рис. 5. Фотография верхней секции камеры очистки, заполненной водой с примесью мела, до (слева) и после обработки (справа).

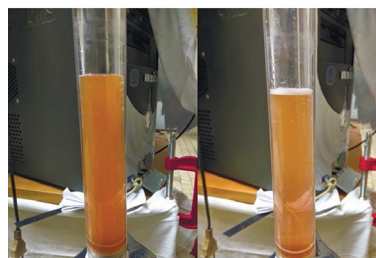


Рис. 6. Фотография верхней секции камеры очистки, заполненной водой с примесью акриловой краски, до (слева) и после обработки (справа).

теневого изображения объема воды с пузырьками. Набор теневых изображений велся в течение времени, за которое видимые пузырьки покидают объем загрязненной воды в верхней секции камеры. Последующая статистическая обработка полученных данных позволила построить распределение концентрации пузырьков по их диаметру [9], предполагая при этом их равномерное распределение в объеме.

После заполнения нижней камеры микропузырьковой средой она отсекалась от верхней камеры запорным краном 3. Затем верхняя секция заполнялась водой с модельным загрязнителем. После перехода жидкости в состояние, близкое к покою, камеры соединялись друг с другом открытием запорного крана 3. Таким образом, микропузырьки под действием выталкивающих сил устремлялись из нижней камеры к открытой поверхности, проходя при этом через загрязненный объем и осуществляя его очистку.

Для оценки эффекта очистки производилось визуальное сравнение цветных изображений загрязненного объема, полученных при помощи цифровой фотокамеры до и после обработки. Исследования выполнены для двух модельных загрязнений: механического (мел с добавлением го-

лубого красителя мелкой фракции) и молекулярного (акриловая краска). На рис. 3 и 4 приведены сравнения окраса раствора до и после обработки при наличии в воде мела и акриловой краски соответственно. На рис. 5 и 6 представлены исходные изображения, из которых взяты фрагменты, приведенные на рис. 3 и 4. Результаты эксперимента демонстрируют возможности рассматриваемого метода очистки воды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты демонстрируют возможности рассматриваемого метода очистки воды от примесей посредством воздушных пузырьков. Проведенные исследования показывают как реальность этого метода, так и его перспективы. Из представленных оценок следует, что рассматриваемый метод не может быть использован как массовый в силу большого числа молекул воздуха в пузырьке, используемом для удаления одной молекулы или частицы примеси. Тем не менее данный метод подходит для специальных случаев, когда из воды необходимо удалить канцерогенные молекулы или бактерии и

вопрос о количестве используемого для этого воздуха не стоит так остро.

Отметим еще одну сторону данной проблемы. При массовой очистке воды, например, от нефти, разлившейся по ее поверхности, поверхностная нефть удаляется механически, т.е. она отбирается в отдельную емкость, в которой содержание нефти велико. В данном случае перед удалением канцерогенных или биологически опасных примесей удобно использовать поверхностный разряд, который уничтожает опасные молекулы, а затем удалять продукты их разложения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (№ 14-12-01295).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bennet R.J.* Self-purification in Natural Waters. In: *Water and Water Pollution Handbook* / Ed. Ciaccio L.L. N.Y.: Dekker, 1971. P. 261.
2. *Crites R.W., Middlebrooks E.J., Reed S.C.* *Natural Wastewater Treatment Systems*. Florida: CRC Press, 2006.
3. *Spellman F.R., Drinan J.E.* *Wastewater Stabilization Ponds*. Boca-Raton: CRC Press, 2014.
4. *Смирнов Б.М., Сон Э.Е., Терешонок Д.В.* Диффузия и подвижность атомных частиц в жидкости // *ЖЭТФ*. 2017. Т. 152. С. 1065.
5. *Бабеева Н.Ю., Berry R.S., Найдис Г.В., Смирнов Б.М., Сон Э.Е., Терешонок Д.В.* Кинетические и электрические явления в газожидкостных системах // *ТВТ*. 2016. Т. 54. № 5. С. 792.
6. *Stokes G.G.* On the Effect of Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums // *Trans. Camb. Philo. Soc.* 1851. V. 9. P. 8.
7. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* *Теоретическая физика. Гидродинамика*. М.: Наука, 1986. 736 с.
8. *Левич В.Г.* *Физико-химическая гидродинамика*. М.: Физматгиз, 1959. 700 с.
9. *Smirnov B.M., Babaeva N.Yu., Naidis G.V. et al.* The Bubble Method of Water Purification // *EPL*. 2018. V. 121. 48007.