

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АГРЕГАЦИИ НАНОЧАСТИЦ МАГНЕТИТА НА КАПЛЯХ ВОДОНЕФТЯНОЙ ЭМУЛЬСИИ

Смирнов Ю. Г., Ивенина И. В.

Ухтинский государственный технический университет  
[yismirnov@ugtu.net](mailto:yismirnov@ugtu.net)

Выполнено теоретическое обоснование процесса агрегации наночастиц магнетита на каплях водонефтяной эмульсии. Сравнение созданной математической модели с результатами эксперимента продемонстрировали связь между размерами эмульсионных капель и временем контакта водонефтяной эмульсии с магнитными наночастицами перед началом магнитной сепарации на степень очистки.

Ключевые слова: численное моделирование, водонефтяная эмульсия, агрегация, наночастицы магнетита

### Введение

В работах [1-3], была описана методика извлечения эмульгированной нефти в магнитном поле из загрязненной воды после обработки водонефтяной эмульсии наночастицами магнетита. В силу высокой удельной поверхностной энергии, эти частицы агрегируются на границе раздела фаз вода-нефть, то есть на поверхности эмульсионных капель. Направленно двигаясь в неоднородном магнитном поле магнитного сепаратора, частицы магнетита увлекают за собой эмульсионные капли нефти, чем и достигается очистка загрязненной воды.

Процесс агрегации магнитных наночастиц на поверхности капель дисперсной фазы эмульсии растянут во времени и зависит от многих факторов, в частности, от температуры, химического состава нефти, размера и концентрации твердых частиц магнетита и микрокапель эмульсии.

В ходе экспериментальной работы [5] были проведены исследования по очистке воды, загрязненной нефтью Ярегского месторождения. Эксперимент показал необходимость обеспечения более длительного контакта магнетита с водонефтяной эмульсией для увеличения эффективности метода. Это обстоятельство может быть объяснено с учетом того, что передвижение наночастиц магнетита обусловлено броуновским движением. Следовательно, необходимо некоторое время для продвижения частиц магнетита к эмульсионным каплям. Процесс может быть ускорен интенсивным перемешиванием. Кроме того, сам процесс образования связей на поверхности капель нефти за счет когезионных сил требует определенного времени.

Целью настоящей работы является теоретическое рассмотрение и численные оценки необходимого времени отстоя смеси нефтяной эмульсии с магнитными наночастицами перед началом процесса магнитной сепарации.

## Математическая модель процесса

Аналогично [5] предположим, что в сосуде объемом  $V$  находится загрязненная нефтью вода в виде водонефтяной эмульсии с плотностью  $\rho_l$ , содержащая эмульсионные капли радиуса  $R_b$ , с удельной плотностью  $\rho_b$ , и массовой концентрацией  $\phi_b$ .

Будем также считать, что там же находятся во взвешенном состоянии наночастицы магнетита радиуса  $R_a$ , с удельной плотностью  $\rho_a$ , и массовой концентрацией  $\phi_a$ . Их коэффициент диффузии пусть будет  $D$ .

Размер и масса наночастиц значительно меньше размеров и массы капелек эмульсии. Поэтому можно считать, что двигаться в результате броуновского движения будут только наночастицы, а значительно более крупные по сравнению с наночастицами капли эмульсии будут практически неподвижны.

Оценим среднее расстояние между эмульсионными каплями. Будем считать, что эмульсионные капли имеют сферическую форму и равномерно распределены в объеме жидкости. Масса эмульсионной частицы  $m_b$  может быть определена по формуле

$$m_b = \frac{4}{3}\pi R_b^3 \rho_b \quad (1)$$

Число эмульсионных капель массой  $m_b$  в объеме жидкости  $V$  будет равно

$$N_b = \frac{V \rho_l \phi_b}{m_b} \quad (2)$$

Разобьем объем  $V$  на  $N_b$  элементарных объемов в виде кубиков со стороной  $L_b$ . Очевидно, что объем элементарного кубика будет равен

$$L_b^3 = \frac{V}{N_b} \quad (3)$$

С учетом (2) из (3) получим

$$L_b^3 = \frac{m_b}{\rho_l \phi_b} \quad (4)$$

Подставим (1) в (4). Получим

$$L_b = \sqrt[3]{\frac{4\pi\rho_b}{3\rho_l\phi_b}} R_b \quad (5)$$

Максимальное расстояние  $L_a$ , которое должна преодолеть наночастица, чтобы достигнуть расположенной в центре элементарного кубика эмульсионной частицы, очевидно, будет равна половине диагонали этого кубика

$$L_a = \frac{\sqrt{3}}{2} L_b \quad (6)$$

С другой стороны, диффузионная длина  $L_a$ , на которую смещается наночастица за интервал времени  $t$  при броуновском движении может быть определена из известной формулы [6]

$$L_a^2 = 6Dt \quad (7)$$

Здесь  $D$  – коэффициент диффузии.

Поскольку нам необходимо найти связь между эмульсионными частицами размера  $R_b$ , на которых агрегируются магнитные наночастицы в течение времени  $t$ , и этим временем, воспользуемся формулами (5-7). Получим

$$L_a^2 = \frac{3}{4} \left( \frac{4\pi\rho_b}{3\rho_l\varphi_b} \right)^3 R_b^2 \quad (8)$$

Объединяя формулы (8) и (9), получим искомую связь

$$t = \frac{1}{8D} \left( \frac{4\pi\rho_b}{3\rho_l\varphi_b} \right)^3 R_b^2 \quad (9)$$

### Результаты и обсуждение

Для выполнения численных расчетов примем коэффициент диффузии в загрязненной нефтью воде равным  $D = 5,56 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$  [7]. Для плотности наночастиц и эмульсий ярегской нефти возьмем значения:  $\rho_a = 5180 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_b = 1,017$

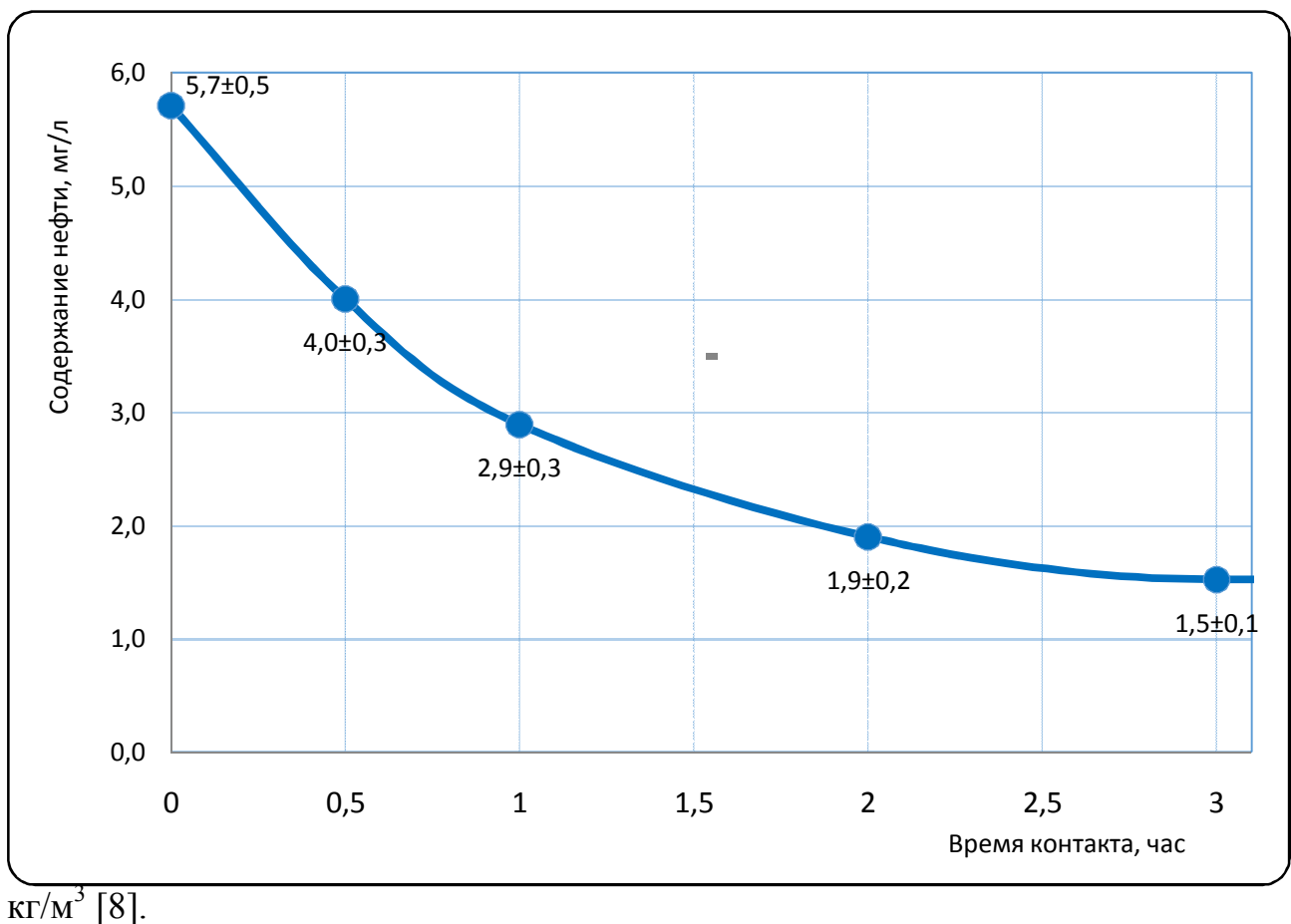


Рис.1. . Зависимость эффективности извлечения нефти от времени контакта загрязненной воды с магнетитом [4].

Примем для наночастиц  $R_a = 10$  нм. Будем выполнять расчеты для эмульсионных капель с радиусами  $R_b$ , меняющимися в диапазоне от 0,5 до 10 мкм. Будем также считать, что степень нефтяного загрязнения жидкости составляет 10 мг/л, что соответствует  $\phi_b = 10^{-5}$ . Положим  $\phi_a = \phi_b$ .

Для сравнения с результатами экспериментальных исследований [4] (рис.1) были выполнены расчеты размеров эмульсионных капель ( $R_b$ ), оставшихся в растворе после отстоя в течение интервала времени  $t$  и последующей магнитной сепарации.

В указанных предположениях численные расчеты по вышеприведенным формулам выполнялись в рамках пакета MatLab. Полученные результаты приведены на рис. 2.

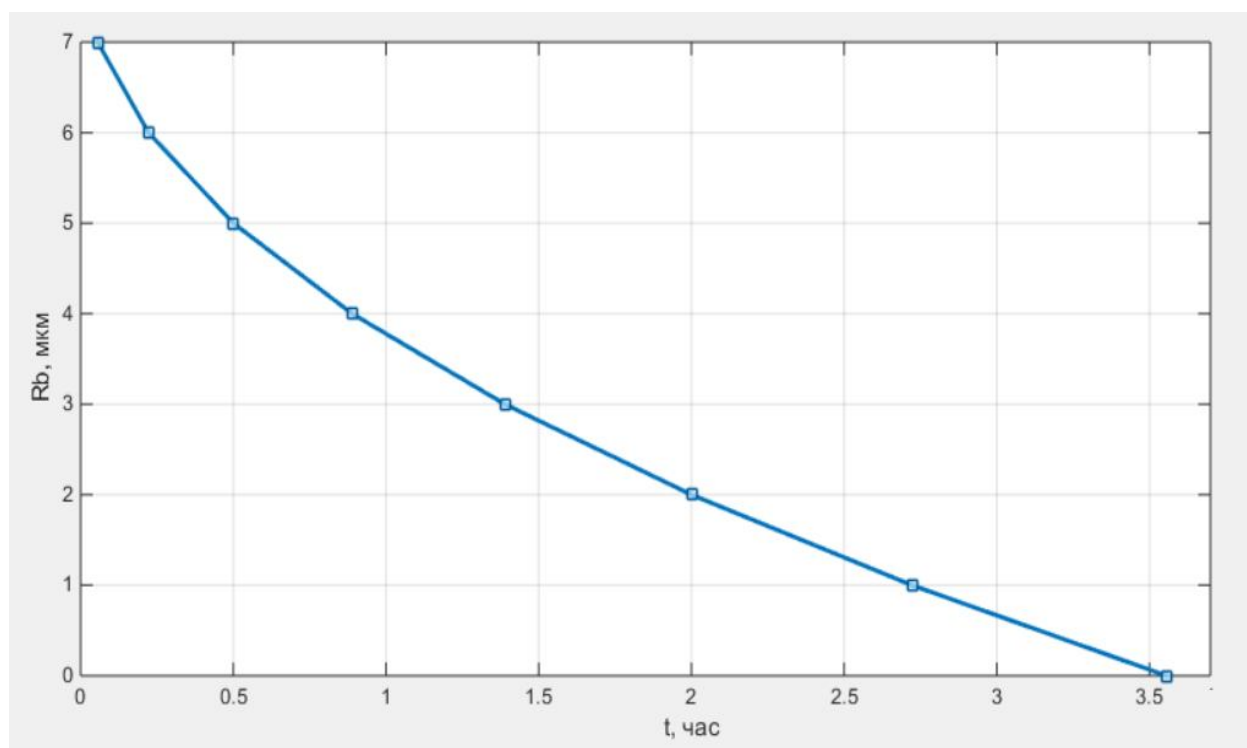


Рис.2 Зависимость размеров эмульсионных капель ( $R_b$ ), оставшихся в растворе после отстоя в течение интервала времени  $t$  и последующей магнитной сепарации.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующее заключение.

1. Сравнение полученной теоретической и экспериментальной зависимостей показывает примерное совпадение их хода, что свидетельствует об адекватности математической модели рассматриваемого процесса.
2. Чем крупнее эмульсионные капли, тем быстрее они омагничиваются за счет агрегирования на них наночастиц магнетита и быстрее выводятся из загрязненной воды.

3. Увеличение времени контакта наночастиц магнетита и загрязненной нефтью воды перед поступлением ее в магнитный сепаратор позволяет повысить степень очистки.

#### Литература

1. Смирнов Ю.Г. Математическое моделирование процесса очистки сточных вод от нефти с использованием магнитных наночастиц // Известия Коми научного центра Уро РАН, 2012, №2(10). С.104-107.
2. Лютоев А.А., Смирнов Ю.Г. Разработка технологической схемы очистки сточных вод от нефтяных загрязнений с использованием магнитных наночастиц // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. 2013. №4. С. 424-435. URL:[http://www.ogbus.ru/authors/LyutoevAA/LyutoevAA\\_1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/LyutoevAA/LyutoevAA_1.pdf).
3. Лютоев А.А., Смирнов Ю.Г., Ивенина И.В. Извлечение эмульгированных примесей нефти из воды при помощи высокодисперсных частиц магнетита // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2014. №4. С. 40-45.
4. Ивенина И.В., Смирнов Ю.Г., Лютоев А.А. Оптимизация продолжительности контакта водонефтяной эмульсии с магнетитом в системе очистки воды от нефти // Рассохинские чтения : материалы международной конференции (7–8 февраля 2019 года). В 2 ч. Ч. 2 – Ухта : УГТУ, 2019. – С.194-196
5. Смирнов Ю.Г., Ивенина И.В. Моделирование процесса омагничивания водонефтяной эмульсии наночастицами магнетита // Физико-математическое моделирование систем: материалы XXI Международного семинара. Воронеж: Ф ГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2020. С . 101-105.
6. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. 3-е изд., перераб. — М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит. 1986. 736 с.
7. Auterrieth T., Robert A., Wagner J., Grubel G. The dynamic behavior of magnetic colloids in suspension // J. Appl. Cryst. 2007. V.40 (Supplement). P. 250-253. URL: <http://journals.iucr.org/j/issues/2007/s1/00/cj6004/>.
8. Ланина Т.Д., Литвиненко В.И., Варфоломеев Б.Г. Процессы переработки пластовых вод месторождений углеводородов: монография. Ухта: УГТУ, 2006. 172 с.

#### NUMERICAL MODELING OF AGGREGATION OF MAGNETITE NANOPARTICLES ON OIL-WATER EMULSION DROPLETS

Smirnov Yu. G., Ivenina I.V.

Ukhta State Technical University

A theoretical substantiation of the process of aggregation of magnetite nanoparticles on drops of water-oil emulsion has been performed. Comparison of the created mathematical model with the results of the experiment demonstrated the relationship between the size of the emulsion droplets and the contact time of the water-oil emulsion with magnetic nanoparticles before the start of magnetic separation for the degree of purification.

Keywords: numerical modeling, oil-water emulsion, aggregation, magnetite nanoparticles