

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ЛЕВИТАЦИИ ДЛЯ ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ СОЛЕЙ В КАПЛЯХ ВОДЫ ЭМУЛЬСИЙ НЕФТИ

Козелкова В.О., Кашаев Р.С., Козелков О.В.

*Казанский государственный энергетический университет, Казань,
Российская Федерация*

Ключевые слова: магнитная, левитация, капли, плотность, соли.

Аннотация. Предложено теоретическое обоснование и описание использования магнитной левитации капель в магнитном поле для определения разности плотностей между водой в капле и в парамагнитном растворе, в котором размещена капля. Выведена формула для определения разности плотностей и концентрации солей от позиции капли в ячейке.

USE OF MAGNETIC LEVITATION FOR CONTROL OF WATER DROPLETS SALINITY IN OILS EMULSIONS

Kozelkova V.O., Kashaev R.S., Kozelkov O.V.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

Keywords: magnetic, levitation, droplets, density, salts.

Abstract. Offered the ground and theoretical description of the use of magnetic levitation of droplets in magnetic field for the determination of the density difference in water of droplet and of paramagnetic solution, in which droplet is inserted. The formula for density difference and salt concentration determination from position of the droplet in the cell is derived.

В нефтяной промышленности возникает проблема простого и быстрого анализа нефтепродуктов на их соответствие стандартам по концентрации солей в воде. Для этого используются такие методы, как релаксометрия протонного магнитного резонанса [1], что требуют сложного оборудования и квалифицированного персонала. В этом плане, описанный в работе [2] метод магнитной левитации *MagLev* открывает возможности определения плотности диамагнитных веществ по их левитации в парамагнитном растворе в магнитном поле. Эта технология применима к диапазону плотностей $\rho = 0,8 \div 3 \text{ г/см}^3$ с точностью $\pm 0,0002 \text{ г/см}^3$ до $\pm 0,02 \text{ г/см}^3$ [3]. Концентрация солей в каплях может отличаться от концентрации в исходной воде. Нами предложено применить данную технологию для измерений концентраций солей воды непосредственно в мелкодисперсных каплях в водо-нефтяных эмульсиях. Благодаря своей портативности, низкой цене, простоте операции с малым объемом образца и измерениям визуальным методом, технология названная нами *MagDens* может найти применение в лабораториях нефтепромыслов.

Предложенная установка для *MagDens* состоит из двух магнитов на сплаве с редкоземельным элементом *NdFeB* и индукцией магнитного поля $B_0 = 0.3 \text{ Тл}$, габаритами $50 \text{ мм} \times 50 \text{ мм} \times 25 \text{ мм}$, расположенных встречно

вертикально полюсами на расстоянии $d = 45$ мм и ячейки с раствором соли $MnCl_2 \cdot 4H_2O$.

Во время левитации на капли воды действуют силы: магнитная ($F_{\text{маг}}$), выталкивающая ($F_{\text{выт}}$) и сила трения ($F_{\text{тр}}$). Капля будет в состоянии левитации между магнитами, если выполняется условие:

$$F_{\text{маг}} + F_{\text{выт}} + F_{\text{тр}} = 0. \quad (1)$$

Капля удерживается во взвешенном состоянии под действием силы $F_{\text{маг}}$ поскольку диамагнетик всегда выталкивается из сильного поля в слабое:

$$F_{\text{маг}} = (M \cdot \nabla) B_0 \text{ или } F_{\text{маг}} = M_z dB/dz, \quad (2)$$

где ∇ – оператор набла, M – магнитный момент капли пропорциональный объему капли V и вычисляемый по формуле:

$$M = V \Delta \chi B / \mu_0, \quad (3)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная, $\Delta \chi$ – разница магнитных восприимчивостей χ_s и χ_m диамагнитной капли и парамагнитного раствора. На каплю в ячейке действует также выталкивающая сила:

$$F_{\text{выт}} = V \Delta \rho g, \quad (4)$$

где $\Delta \rho = (\rho_k - \rho_c)$ – разность плотностей воды в капле и в парамагнитной среде. На каплю при движения со скоростью v действует сила трения $F_{\text{тр}}$, которая для сферических капель рассчитывается по формуле:

$$F_{\text{тр}} = 6\pi R \eta f v, \quad (5)$$

где R – радиус капли, η – динамическая вязкость парамагнитной среды, коэффициент трения $f_D = 1$, если капля далеко от стенки ячейки. При равновесии капли силы равны: $F_{\text{тр}} = 0$; $F_{\text{маг}} + F_{\text{выт}} = 0$, и можно записать:

$$(V \chi_m / \mu_0) (B_x \partial B_z / \partial x + B_y \partial B_z / \partial y + B_z \partial B_z / \partial z) = V (\rho_s - \rho_m) g, \quad (6)$$

где $\chi_s \approx 4 \times 10^{-6}$, $\chi_m \approx 3.2 \cdot 10^{-4} \text{ М}^{-1}$. Из уравнения (6) видно, что радиус капли R (или V) не влияет на высоту h левитации капли. Силы можно записать:

$$F_{\text{маг}} + F_{\text{выт}} = (\rho_k - \rho_c) V g + 1/\mu_0 (\chi_s - \chi_m) V (B \cdot \nabla) B = 0. \quad (7)$$

Эти две силы балансируют вдоль оси между магнитами. Из уравнений (6, 7) можно определить h капли, которая линейно пропорциональна $\Delta \rho$:

$$h = \{[(\rho_k - \rho_c) g \mu_0 d] / [(\chi_s - \chi_m) 4 B_0^2] + d/2\}. \quad (8)$$

Измеряя h и используя уравнение (8) можно определять $\Delta \rho = (\rho_k - \rho_c)$ из уравнения

$$(\rho_k - \rho_c) = (2h - d) [(\chi_s - \chi_m) 4 B_0^2 / 2 g \mu_0 d]. \quad (9)$$

Определив плотность ρ_k и зная плотность парамагнитного раствора ρ_c , можно по известным соотношениям между плотностью раствора и концентрацией соли определить концентрацию солей C в воде капли.

По нашим экспериментальным оценкам плотность воды, а соответственно и концентрация солей определяется с точностью 10^{-4} г/мл.

Оценка погрешность метода *MagDens* показала, что метод не хуже метода ПМР-релаксометрии [1], но проще и экономически предпочтительнее.

Список литературы / References

1. Козелков О.В., Кашаев Р.С. Приборные и мехатронные комплексы в нефтяной промышленности и энергетике. – Махачкала: Апробация, 2019. – 112 с.
 1. Kozelkov O.V., Kashaev R.S. Instrument and mechatronik complexes in oil industry and energetic. – Makhachkala: Approbation, 2019. – 112 p.
2. Mavromoustakos T., Zervou M., Bonas G., Kolocouris A., Petrakis P. A novel analytical method to detect adulteration of virgin olive oil by other oils // Journal of the American Oil Chemists' Society. 2000, no. 77 (4), pp. 405-411.
3. Mirica K.A., Shevkoplyas S.S., Phillips S.T., Gupta M., Whitesides G.M. Measuring densities of solids and liquids using magnetic levitation: fundamentals // Journal of the American Chemical Society. 2009, no. 131 (29), pp. 10049-10058.

Козелкова Валерия Олеговна – аспирант	Kozelkova Valeriya Olegovna – post graduate
Кашаев Рустем Султанхамитович – доктор технических наук, профессор	Koshaev Rustem Sultankhamitovich – doctor of technical sciences, professor
Козелков Олег Владимирович – кандидат технических наук, доцент	Kozelkov Oleg Vladimirovich – docent, candidate of technical sciences
Kashaev2007@yandex.ru	

Received 12.09.2022