

УДК 538.93

ДИНАМИКА ВСПЛЫВАЮЩИХ КАПЕЛЬ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В ГЛИЦЕРИНЕ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

© 2024 г. Е. А. Соколов¹, Д. А. Калюжная¹, А. А. Прибылов¹,
Р. Е. Политов¹, П. А. Ряполов¹, *

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет», Курск, Россия

*E-mail: r-piter@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.01.2024

После доработки 29.04.2024

Принята к публикации 28.06.2024

Представлены результаты исследования влияния величины напряженности магнитного поля и концентрации магнитной фазы магнитной жидкости на коэффициент удлинения и форму капли магнитной жидкости, всплывающей в глицерине. Получены зависимости коэффициента удлинения капли магнитной жидкости от параметров используемых магнитных жидкостей и значения напряженности магнитного поля.

Ключевые слова: магнитная жидкость, коэффициент удлинения, намагниченность, неоднородное магнитное поле, магнитожидкостная капля

DOI: 10.31857/S0367676524100216, **EDN:** DRWJUH

ВВЕДЕНИЕ

Магнитные жидкости (МЖ) представляют собой уникальные материалы, обладающие способностью реагировать на воздействие магнитного поля. Они состоят из наночастиц магнитного материала, распределенных в жидкой среде [1].

Важными параметрами, определяющие свойства МЖ, являются магнитная восприимчивость и намагничивание, которые способствуют изменению свойств магнитной жидкости под действием магнитного поля [2, 3], что открывает новые возможности для управления их характеристиками и применения для различных технологических решений [4, 5].

Актуальность работы обусловлена важностью и широким применением магнитных жидкостей в различных областях науки и техники, такой как микрофлюидные технологии с использованием магнитных жидкостей [6, 7]. Исследование влияния величины напряженности магнитного поля и концентрации магнитной фазы на форму и коэффициент удлинения капли МЖ является актуальным, так как позволяет лучше понять и контролировать свойства этих материалов [8, 9].

Полученные в ходе работы данные могут быть полезны при проектировании и оптимизации систем, использующих магнитные жидкости. Например, в медицине они могут применяться для доставки

лекарственных препаратов в организм [10], а в робототехнике — для создания гибких и управляемых роботов [11]. Также результаты исследования могут способствовать разработке новых технологий и улучшению существующих методов использования МЖ.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования были проведены на установке, блок-схема которой представлена на рис. 1.

Плоский стеклянный канал 1 (толщина 2 мм), установлен вертикально с помощью системы немагнитных крепежных элементов и заполняется глицерином. В качестве источника неоднородного магнитного поля используется соленоид 2, который расположен соосно оси канала и подключен к источнику питания 3, который необходим для изменения напряженности магнитного поля. Для подачи магнитной жидкости снизу подведена трубка шприцевого насоса 4. В качестве источника света используется управляемый светодиодный осветитель 5. Видеофиксация динамики всплывающих капель магнитной жидкости в глицерине при воздействии на нее магнитного поля разной напряженности осуществляется в проходящем свете с помощью высокоскоростной камеры (Nikon 1) 6, подключенной к компьютеру 7. Обработка изображений и расчет коэффициента

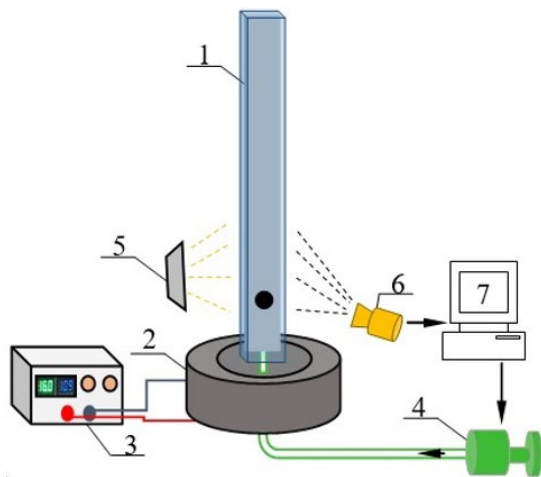


Рис. 1. Блок-схема установки.

удлинения магнитного включения осуществляется с помощью программы Digimizer.

С помощью миллесламетра ТПУ была получена зависимость напряженности магнитного поля соленоида от силы тока и расстояния до него, которая показана на рис. 2.

Здесь за ноль по оси абсцисс принимается расстояние от верхнего витка катушки соленоида. Расстояние, при котором происходило включение цепи электромагнита, и воздействие на каплю МЖ магнитным полем, соответствовало 20 мм.

В работе использовались магнитные жидкости с различной концентрацией магнитной фазы, полученные путем разбавления исходного образца МЖ жидкостью-носителем — минеральным маслом. Исходный образец МЖ был получен в Ивановском государственном энергетическом университете на основе высокодисперсного магнетита Fe_3O_4 , стабилизированного поверхностно-активным веществом — олеиновой кислотой $C_8H_{17}CH=CH(CH_2)_7-COOH$. Измерения физических параметров, исследуемых образцов МЖ, проводились по методикам и на установках, разработанных в лаборатории наномасштабной

акустики Юго-Западного государственного университета. Физические параметры исследуемых образцов представлены в табл. 1. Физические параметры глицерина указаны в табл. 2.

Таблица 1. Физические характеристики исследуемых образцов МЖ.

Параметры	МЖ-1	МЖ-2	МЖ-3
Плотность жидкости-носителя, ρ , кг/м ³	841		
Вязкость жидкости-носителя η , сП	17		
Плотность ρ , кг/м ³	1018	897	890
Объемная концентрация φ , %	4.26	1.35	0.98
Вязкость η , сП	69	39.6	23.05
Намагниченность насыщения, M_s , кА/м	17	8.7	3.3
Магнитная восприимчивость, χ	0,84	0,41	0,13

Таблица 2. Физические параметры глицерина.

Параметры	Глицерин
Плотность, ρ , кг/м ³	1260
Вязкость, сП	1480

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В результате эксперимента были получены данные эволюции формы капли МЖ, всплывающей в стеклянном плоском канале, заполненном глицерином, под действием магнитного поля различной напряженности, показанные на рис. 3.

Из кадров наглядно видно, что величина напряженности магнитного поля и концентрация магнитной фазы МЖ оказывают значительное влияние на динамику магнитожидкостной капли в глицерине. При увеличении напряженности магнитного поля, происходит вытягивание капли МЖ. Также данный эффект особенно проявляется при использовании МЖ с большей концентрацией магнитной фазы.

С помощью программной среды Digimizer получены зависимости коэффициента удлинения капли МЖ от параметров используемых магнитных жидкостей и значения напряженности магнитного поля, представленные на рис. 4.

Из графика видно, что коэффициент удлинения тем больше, чем выше напряженность магнитного поля соленоида и концентрация магнитной фазы МЖ.

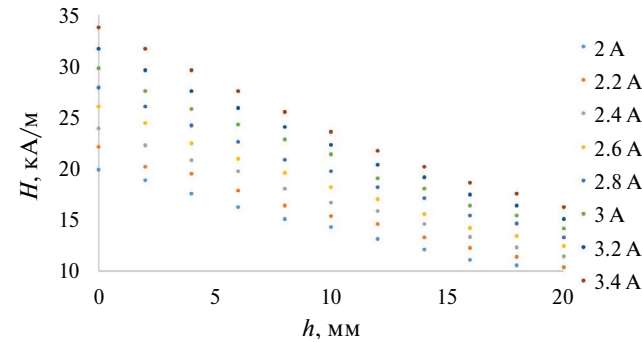


Рис. 2. Зависимость напряженности магнитного поля соленоида от силы тока и расстояния до него.

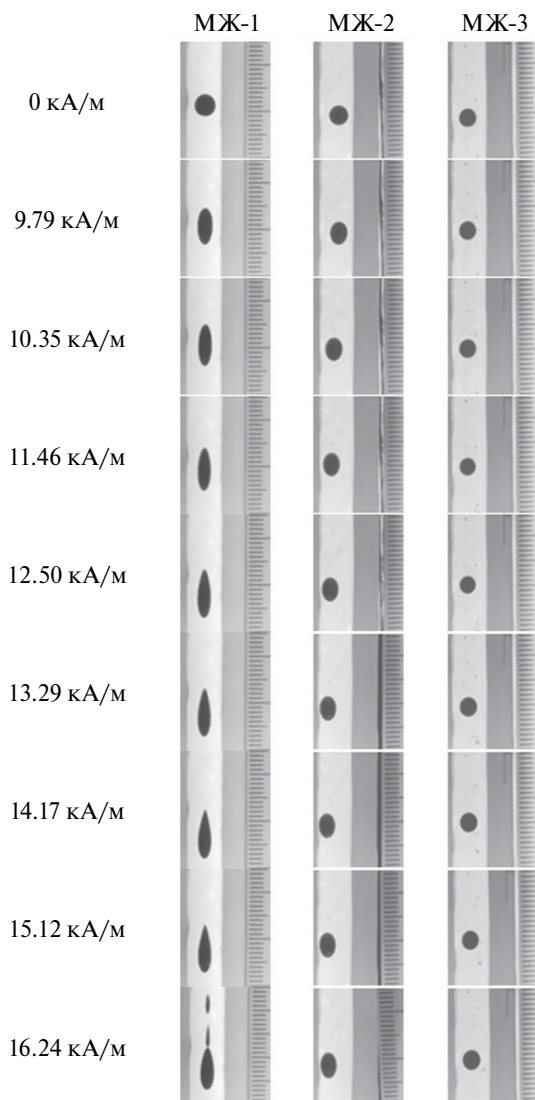


Рис. 3. Формирование геометрии капель МЖ различной концентрации в зависимости от напряженности магнитного поля.

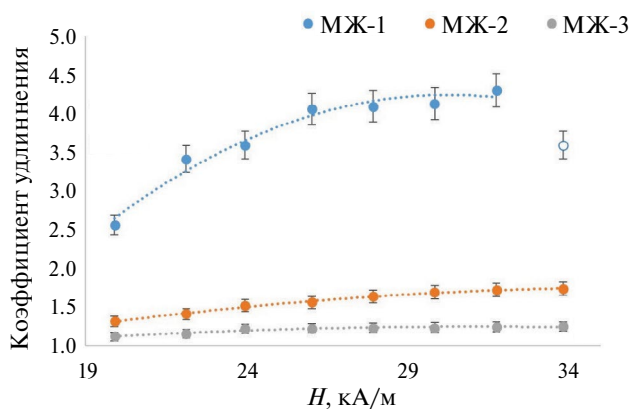


Рис. 4. Зависимость коэффициента удлинения капли МЖ от параметров используемых магнитных жидкостей и напряженности магнитного поля.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ КАПЛИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В НЕМАГНИТНОЙ

Алгоритм решеточных уравнений Больцмана для мультикомпонентной системы был реализован с помощью языка программирования «Python 3». В процессе моделирования, кроме стандартных операций, предлагаемых данным языком программирования, была использована библиотека «numpy», осуществляющая быстрые математические операции с многомерными числовыми массивами. Для достижения наибольшей производительности, все вычисления производились в параллельном режиме на видеокарте (nvidia geforce gtx 1050). Распараллеливание кода было осуществлено посредством использования библиотеки «numba». Графическое представление результатов вычислений реализовано инструментами визуализации библиотеки «matplotlib».

Алгоритм включает в себя два решеточных уравнения. Первое описывает только кинетику течения жидкостей и во втором порядке точности воспроизводит уравнение Навье—Стокса и уравнение непрерывности:

$$f_{\alpha}(\vec{r} + \vec{e}_{\alpha}\delta t, t + \delta t) - f_{\alpha}(\vec{r}, t) = \frac{f_{\alpha}^{eq}(\vec{r}, t) - f_{\alpha}(\vec{r}, t)}{\tau_f} + \vec{F}_{\alpha}\delta t, \quad (1)$$

где $f_{\alpha}(\vec{r}, t)$ — плотность частиц в узле $\vec{r}$, движущихся со скоростью $\vec{e}_{\alpha}$, $f_{\alpha}^{eq}(\vec{r}, t)$ — соответствующая плотность в равновесном распределении, $\tau_f = v^2/c_s^2 - 0.5$ — время релаксации, где v — кинематическая вязкость, δt — шаг по времени, $\vec{F}_{\alpha}$ — тензор, определяющий действие внешних силовых полей. В случае наличия сил тяжести, поверхностного натяжения, и магнитной пондеромоторной силы:

$$\vec{F}_{\alpha} = \left(1 - \frac{1}{2\tau_f}\right) \frac{\vec{e}_{\alpha} - \vec{u}}{c_s^2} \times \left[c_s^2 \nabla \rho (\Gamma_{\alpha} - \omega_{\alpha}) + \Gamma_{\alpha} (\vec{f}_s + \vec{f}_m + \vec{f}_g) \right], \quad (2)$$

где Γ_{α} — некоторая функция, $c_s^2 = 1/3$, $\vec{f}_s = \mu \nabla \phi$ — сила поверхностного натяжения (μ — химический потенциал, ϕ — относительная концентрация тяжелой фазы), $\vec{f}_m = \frac{\mu_0 x}{2} \nabla |\vec{H}|^2$ — пондеромоторная сила (μ_0 — магнитная постоянная, x — магнитная восприимчивость, $\vec{H}$ — напряженность магнитного поля), $\vec{f}_g = \rho \vec{g}$ — сила тяжести.

Второе уравнение описывает кинетику пространственного распределения фаз, и во втором порядке точности воспроизводит уравнение Кана—Хилларда:

$$g_{\alpha}(\vec{r} + \vec{e}_{\alpha}\delta t, t + \delta t) - g_{\alpha}(\vec{r}, t) = \frac{g_{\alpha}^{eq}(\vec{r}, t) - g_{\alpha}(\vec{r}, t)}{\tau_{\phi}} + \left(1 - \frac{1}{2\tau_{\phi}}\right) \omega_{\alpha} q \delta t, \quad (3)$$

где $g_\alpha(\vec{r}, t)$ — плотность частиц более тяжелой фазы в узле $\vec{r}$, движущихся со скоростью $\vec{e}_\alpha$, $g_\alpha^{\text{eq}}(\vec{r}, t)$ — соответствующая плотность в равновесном распределении, τ_ϕ — время релаксации для данного уравнения, ω_α — весовой коэффициент для частиц типа α , q — корректор, гарантирующий сохранение массы более легкого компонента (в достаточно коротких по времени симуляциях принимается равным нулю).

Приведенные уравнения полностью определяют эволюцию системы во времени. Макроскопические параметры системы определяются из них по формулам:

$$\phi = \sum_{\alpha} g_{\alpha} + \frac{1}{2} q \delta t, \quad (4)$$

$$\rho = \phi \rho_L + (1 - \phi) \rho_G, \quad (5)$$

$$\rho \vec{u} = \sum_{\alpha} f_{\alpha} \vec{e}_{\alpha} + \vec{F} \frac{\delta t}{2}, \quad (6)$$

$$\rho_0 = \sum_{\alpha} f_{\alpha} + \frac{1}{2} \vec{u} \cdot \nabla \rho \delta t, \quad (7)$$

где ϕ — относительная концентрация тяжелой фазы, ρ — плотность, u — поле скоростей, ρ_0 — усредненная плотность компонентов (ρ_L — плотность тяжелой фазы, ρ_G — плотность легкой фазы). В данной работе расчеты производились с использованием сетки типа «D2Q9» со стандартными значениями e_α и ω_α . В данной работе расчеты производились с использованием сетки типа «D2Q9» со стандартными значениями $\vec{e}_\alpha$ и ω_α . Формулы для расчета значений $f_\alpha^{\text{eq}}(\vec{r}, t)$, $g_\alpha^{\text{eq}}(\vec{r}, t)$ и Γ_α были взяты из работ [12, 13].

На границах области, в которой проводится симуляция, были заданы граничные условия «bounce back», которые для стандартной сетки «D2Q9» имеют следующий вид:

$$f_1 = f_3, \quad f_2 = f_4, \quad f_5 = f_7, \quad (8)$$

$$g_1 = g_3, \quad g_2 = g_4, \quad g_5 = g_7. \quad (9)$$

Пусть внешнее магнитное поле задано с помощью соответствующего ему скалярного потенциала A_0 . Тогда, результирующее магнитное поле представимо в виде суммы внешнего поля и поля, создаваемого материалом магнитной среды, так что $A = A_0 + A_{\text{mat}}$. При подстановке такого разложения в уравнения Максвелла для магнитного поля и учета того, что для внешнего поля должно строго выполняться равенство $\nabla^2 A_0 = 0$, получается следующее итоговое уравнение, позволяющее определить A_{mat} при заданном A_0 :

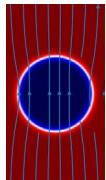
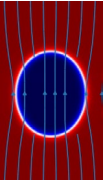
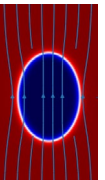
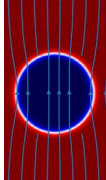
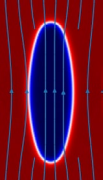
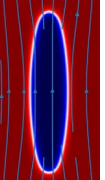
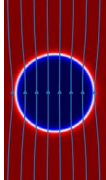
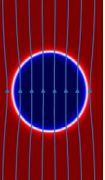
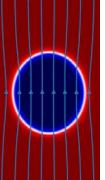
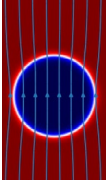
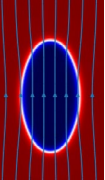
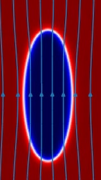
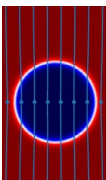
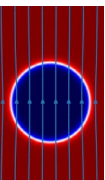
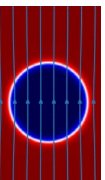
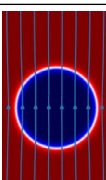
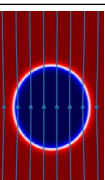
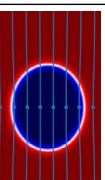
$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_{\text{mat}}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_{\text{mat}}}{\partial y} \right] = - \frac{\partial \mu^{-1}}{\partial x} \frac{\partial A_0}{\partial x} - \frac{\partial \mu^{-1}}{\partial y} \frac{\partial A_0}{\partial y},$$

где $\mu = 1 + \chi$ — магнитная проницаемость среды.

Расчеты проводили в сетке размером 200×200 и шагом по времени около 0.2 мс. Моделируемая система включает в себя две фазы, одна из которых

является магнитная жидкость различной концентрации, а второй — глицерин. Физические характеристики данных жидкостей приведены в табл. 1 и 2. Во всех случаях, для границы раздела фаз были приняты значения параметров $\sigma = 7$ мН/м, $\tau_g = 1.2$, $Q = 0.1$. Толщина поверхностного слоя $W = 4$ периода решетки. Численное моделирование проводилось внутри квадратной области со стороной 2.5 см, в центре которой в начальный момент времени находится сферическая магнитной жидкости радиуса 2.5 мм. Вся система находится во внешнем постоянном магнитном поле, направленном вверх и равном 10, 15 и 30 кА/м, и в отсутствии силы тяжести. В табл. 3

Таблица 3. Результаты численного моделирования.

Образец	Величина поля, кА/м	0 с	30 с	60 с
МЖ-1	10			
	30			
МЖ-2	10			
	30			
МЖ-3	10			
	30			

показаны результаты моделирования магнитной капли в немагнитной жидкости при приложении внешнего однородного магнитного поля.

«Приоритет-2030» (Соглашения № 075-15-2021-1155 и № 075-15-2021-1213).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования представлены основные физические свойства исследуемых магнитных жидкостей. Проведены эксперименты, в результате которых была визуализирована динамика всплытия капли магнитной жидкости под действием магнитного поля.

Одним из основных результатов работы является определение зависимости между величиной напряженности магнитного поля и формой капли магнитной жидкости. Было установлено, что при увеличении силы поля капля приобретает более вытянутую форму по сравнению с действием магнитного поля с меньшей напряженностью.

Также установлена зависимость коэффициента удлинения капли МЖ от концентрации магнитной фазы и напряженности магнитного поля. Было выяснено, что полученный показатель увеличивается с ростом концентрации магнитной фазы и напряженности магнитного поля.

Получены результаты моделирования капли магнитной жидкости в немагнитной при приложении внешнего однородного магнитного поля.

Полученные данные способствуют развитию в сфере проектирования систем, использующих магнитные жидкости, таких как микронасосы или актуаторы, а также оптимизации технологических процессов, например, при разработке методов сепарации или микроэлектромеханических систем.

Экспериментальные исследования выполнены при поддержке гранта № 24-22-00309 (<https://rscf.ru/project/24-22-00309/>), численное моделирование произведено в рамках реализации программы стратегического академического лидерства

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенцвейг Р.Е. Феррогидродинамика. М.: Мир, 1989. 240 с.
2. Ivanov A.S., Pshenichnikov A.F., Khokhryakova C.A. // Phys. Fluids. 2020. P. 112007.
3. Тятюшкин А.Н. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 7. С. 885; Tyatyushkin A.N. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 7. P. 804.
4. Такетоми С., Тикадзуми С. Магнитные жидкости. М.: Мир, 1993. 272 с.
5. Бельх С.С., Ерин К.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 7. С. 962; Belykh S.S., Yerin C.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 7. P. 878.
6. Ряполов П.А., Соколов Е.А., Шельдешова Е.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 3. С. 343; Ryapolov P.A., Sokolov E.A., Shel'deshova E.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 3. P. 295.
7. Ряполов П.А., Соколов Е.А., Калюжная Д.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 3. С. 348; Ryapolov P.A., Sokolov E.A., Kalyuzhnaya D.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 3. P. 300.
8. Li X., Yu P., Niu X.D. et al. // Appl. Math. Comput. 2021. V. 393. Art. No. 125769.
9. Li X., Dong Z.Q., Yu P. et al. // Phys. Fluids. 2020. Art. No. 083309.
10. Huang X., Saadat M., Bijarchi M.A. et al. // Chem. Eng. Sci. 2023. Art. No. 118519.
11. Zhang Y., Jiang S., Hu Y. et al. // Nano Lett. 2022. P. 2923.
12. Li X. et al. // Appl. Math. Comput. 2021. V. 393. Art. No. 125769.
13. Niu X.D., Li Y., Ma Y.R. et al. // Phys. Fluids. 2018. V. 30. No. 1. Art. No. 013302.

Dynamics of floating droplets of magnetic liquid in glycerin in a flat channel under the influence of a magnetic field

E. A. Sokolov¹, D. A. Kalyuzhnaya¹, A. A. Pribylov¹, R. E. Politov¹, P. A. Ryapolov^{1, *}

¹Southwest State University, Kursk, 305040 Russia

*e-mail: r-piter@yandex.ru

The results of the study of the influence of the magnitude of the magnetic field strength and the concentration of the magnetic phase of the magnetic fluid (MF) on the elongation coefficient and the shape of the drop of MF floating in glycerin are presented. The dependences of the elongation coefficient of the ML droplet on the parameters of the magnetic fluids used and the strength of the magnetic field intensity are obtained.

Keywords: magnetic fluid, elongation coefficient, magnetization, inhomogeneous magnetic field, magnetofluidic drop.