

УДК 536.24:538.4

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОВОГО ПУЗЫРЬКА В ДВУХСЛОЙНОЙ СРЕДЕ МАГНИТНАЯ И НЕМАГНИТНАЯ ЖИДКОСТЬ

Ганиева М.А., Тимченко Д.А., Симоновский А.Я.

*ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет», Ставрополь,
e-mail: inf@stgau.ru*

В работе изучается движение пузырька газа, выдуваемого через трубку, расположенную на дне магнитной жидкости, заполняющей стеклянную цилиндрическую колбу. Пузырек всплывает под действием силы тяжести и пересекает границу раздела магнитная – немагнитная жидкость. Немагнитная жидкость является прозрачной жидкостью. Траектория движения пузырька регистрируется скоростной видеокамерой. Найденную из наблюдений траекторию движения пузырька в прозрачной жидкости описывают математическими средствами. Траектория представляет собой спиралевидную кривую, которая во фронтальной проекции имеет вид гармонического колебания. Данное гармоническое колебание подвергается Фурье-анализу, спектр которого представляется на ряде рисунков. Во второй части работы описано явление колебаний поверхности истекающей из отверстия капли магнитной жидкости в переменном магнитном поле промышленной частоты.

Ключевые слова: математическое моделирование, магнетизм, магнитная жидкость, фигуры равновесия, механика жидкости

MATHEMATICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE MOTION OF A GAS BUBBLE IN A TWO-LAYER MEDIUM MAGNETIC AND NONMAGNETIC LIQUID

Ganieva M.A., Timchenko D.A., Simonovskiy A.Ya.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Stavropol State Agrarian
University, Stavropol, e-mail: inf@stgau.ru*

This study examines the motion of a gas bubble blown through a tube located at the bottom of a magnetic fluid that fills a cylindrical glass flask. The bubble emerges under the action of gravity and crosses the magnetic – non-magnetic fluid interface. Non-magnetic fluid is a clear fluid. The trajectory of the bubble is recorded with a high-speed video camera. The trajectory of motion of a bubble in a transparent liquid found from observations is described by mathematical means. The trajectory is a spiral curve, which in the frontal projection has the form of a harmonic oscillation. This harmonic oscillation is subjected to Fourier analysis, the spectrum of which is represented in a number of drawings. The second part of the work describes the phenomenon of oscillations of the surface of a drop of magnetic fluid flowing from an aperture in an alternating magnetic field of industrial frequency.

Keywords: mathematical modeling, magnetism, magnetic fluid, equilibrium figures, fluid mechanics

Наблюдение за движением пузырька воздуха, выдуваемого из трубки расположенной у дна немагнитной цилиндрической колбы, заполненной магнитной жидкостью, поверх которой залита прозрачная немагнитная среда, проводилось по схеме, представленной на рис. 1 [1].

В магнитной жидкости 1, покрытой прозрачной немагнитной жидкостью 2, залитый в стеклянный контейнер 3, через трубки 4, выдувался пузырь газа. Вне стеклянного цилиндра, с помощью катушек Гельмгольца 5, создавалось магнитное поле. Пузырек, образованный на дне цилиндра, всплывал и пересекал границу раздела 6 магнитная – немагнитная среда. При пересечении границы он захватывал малый объем магнитной жидкости.

Пузырек, покрытый магнитной жидкостью, двигался вверх по винтовой линии.

Всплытие пузырька, при включенном магнитном поле катушек Гельмгольца, регистрировались цифровой видеокамерой. Результаты этого наблюдения представлены на рис. 2.

С помощью этих рисунков изучалось движение пузырьков разной формы и размеров. Форма и размеры пузырька изменялись величиной приложенного магнитного поля [2].

В вертикальном направлении этих рисунков отложены вертикальные координаты движения пузырька, вдоль горизонтальной оси отложены горизонтальные перемещения пузырька при всплытии.

Траектория всплытия пузырька была описана с помощью математического пакета MathCad и представлена на рис. 3.

Колебание угла φ показанного на рис. 2, а, характеризующего поворот боль-

шой полуоси пузырька эллиптической формы относительно горизонта происходило по закону, графически представленному на рис. 4. Как следует из представленных на рис. 2, а, б траекторий движения пузырька, это движение представляет собой гармоничное колебание. Траекторию движения пузырька при всплывании подвергали анализу Фурье. То есть находили набор гармоник в спектре этого периодического процесса. Найденный спектр имеет вид представленный на рис. 4.

ческое колебание. Траекторию движения пузырька при всплывании подвергали анализу Фурье. То есть находили набор гармоник в спектре этого периодического процесса. Найденный спектр имеет вид представленный на рис. 4.

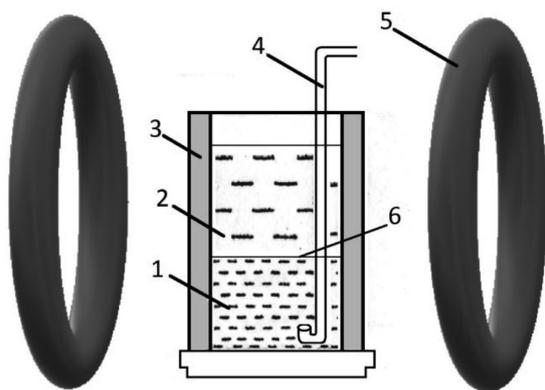


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
1 – магнитная жидкость, 2 – немагнитная прозрачная жидкость, 3 – стеклянный цилиндрический контейнер, 4 – пластиковая трубка, 5 – катушки Гельмгольца, 6 – граница раздела магнитной и немагнитной жидкости

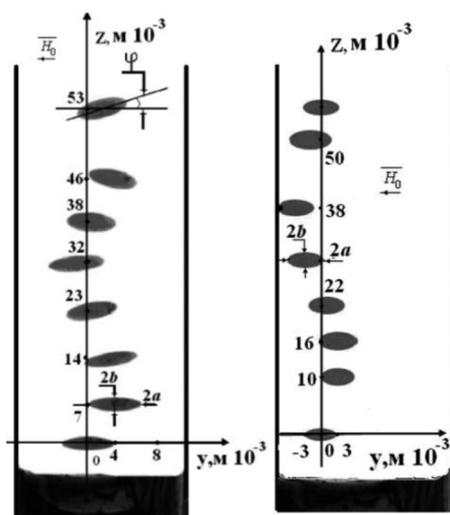


Рис. 2. Этапы движения пузырьков газа, окаймлённые магнитной жидкостью:
 \vec{H}_0 – направление внешнего магнитного поля;
a и b – полуоси эллиптического пузырька

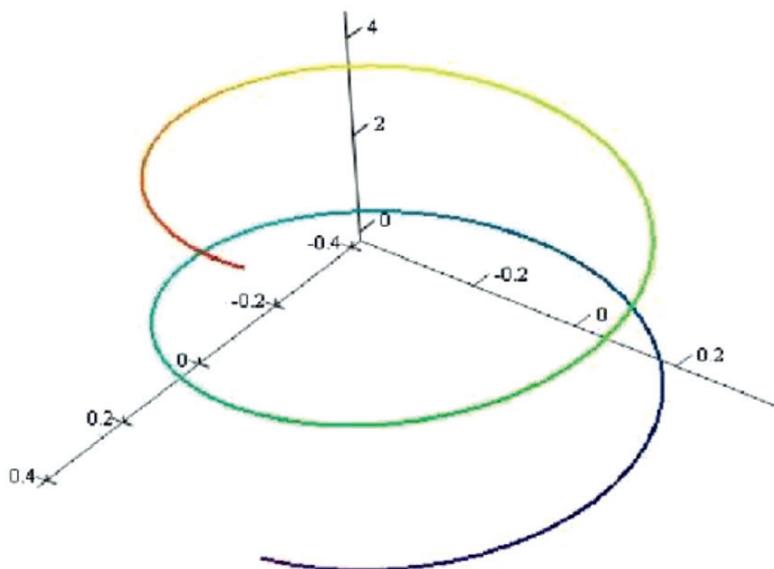


Рис. 3. Винтовая траектория движения пузырька. На осях отложены размеры в $m \cdot 10^{-2}$

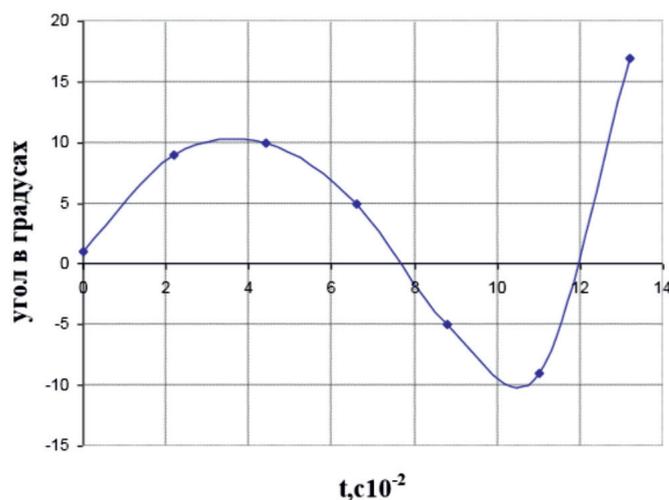


Рис. 4. Зависимость изменения угла φ отклонения большой полуоси (рис. 2, а) пузырька от горизонтальной оси от времени

Многочлен Фурье, характеризующий изменения угла φ при движении пузырька на рис. 2, а имеет вид:

$$\begin{aligned} \varphi_1(t) = & -6,871 + 10,004 \cos\left(\frac{\pi t}{3}\right) + 16,498 \sin\left(\frac{\pi t}{3}\right) - 3,039 \cos\left(\frac{2\pi t}{3}\right) - \\ & - 10,313 \sin\left(\frac{2\pi t}{3}\right) + 1,396 \cos(\pi t) + 7,164 \sin(\pi t) - \\ & - 0,794 \cos\left(\frac{4\pi t}{3}\right) - 5,451 \sin\left(\frac{4\pi t}{3}\right) + \dots \end{aligned}$$

Объем пузырька в прозрачной жидкости менялся по закону приведенному на рис. 5. А пульсирующая форма пузырька мало отличалась от формы эллипсоида вращения с большой полуосью, направленной вдоль вектора внешнего магнитного поля, мог быть представлен в виде многочлена Фурье следующим образом:

а) для пузырька на рис. 2, а

$$\begin{aligned} V_1(t) = & -0,039 + 0,076 \cos\left(\frac{\pi t}{2}\right) + 0,076 \sin\left(\frac{\pi t}{2}\right) - 0,023 \cos(\pi t) - \\ & - 0,056 \sin(\pi t) + 0,01 \cos\left(\frac{3\pi t}{2}\right) + 0,04 \sin\left(\frac{3\pi t}{2}\right) - \\ & - 0,005943 \cos(2\pi t) - 0,031 \sin(2\pi t) + \dots \end{aligned}$$

б) для пузырька на рис. 2, б

$$\begin{aligned} V_2(t) = & 1 - 0,1177 \cos\left(\frac{5\pi t}{18}\right) - 1,568 \sin\left(\frac{5\pi t}{18}\right) + 0,03 \cos\left(\frac{5\pi t}{9}\right) - 0,788 \sin\left(\frac{5\pi t}{9}\right) \\ & + 0,013 \cos\left(\frac{5\pi t}{6}\right) + 0,525 \sin\left(\frac{5\pi t}{6}\right) - 0,007411 \cos\left(\frac{10\pi t}{9}\right) - 0,394 \sin\left(\frac{10\pi t}{9}\right) + \dots \end{aligned}$$

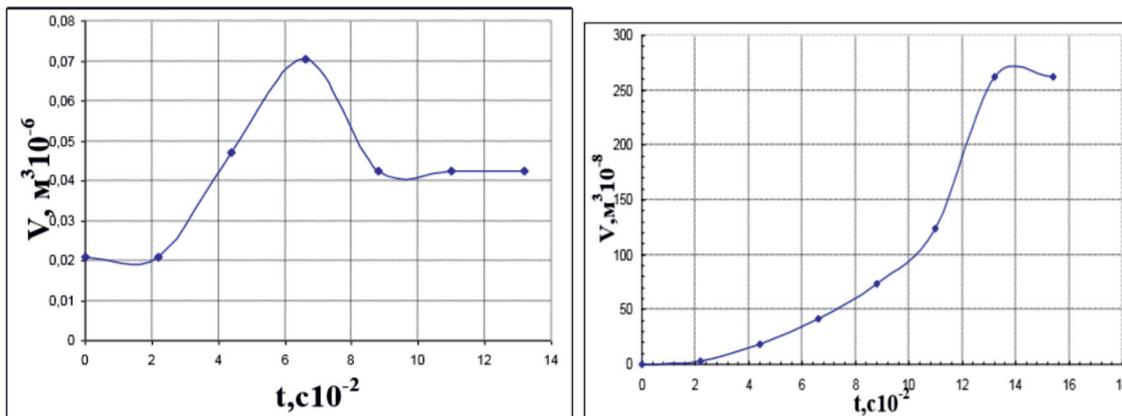


Рис. 5. График зависимости объема пузырька от времени: а) колебания объема пузырька рис. 2, а; б) колебание объема пузырька рис. 2, б

Описанный характер движения пузырька, объяснялся законами гидродинамики немагнитной жидкости омывающей пузырек. Магнитная жидкость, переносимая пузырьками, накапливалась на поверхности прозрачного слоя жидкости. И при достижении большого веса начинает каплями опускаться вниз. Падение капель представлено на рис. 6.

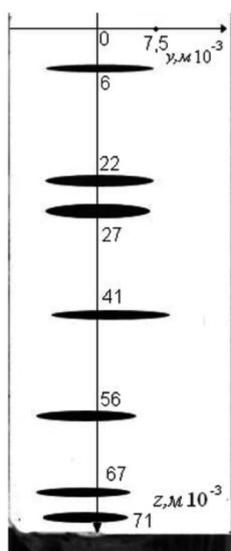


Рис. 6. Кинограмма падения капли магнитной жидкости

Первую половину пути капля движется равномерно и прямолинейно. Заметно лишь колебания объема капли. Вторую половину пути капля проходит по спирали со значительными колебаниями объема. Осуществлялся Фурье-анализ этих колебаний. Результаты разложения колебаний, падающих капель в ряды Фурье представлены графиче-

чески на рис. 7, а, б, где ω – частота колебания, A – амплитуда колебания.

Параметрические колебания капли магнитной жидкости, отрывающейся от горизонтальной поверхности в переменном магнитном поле [3].

Предыдущее наблюдение и анализ имели целью моделировать экспериментально и теоретически явления образования, роста и всплывания пузырьков пара при различных режимах парообразования магнитной жидкости. Для той же цели мы приведены результаты наблюдения роста и отрыва капли магнитной жидкости от горизонтальной поверхности, выполненной из немагнитного материала в зависимости от внешнего постоянного и переменного магнитного поля. Использовался оптический метод регистрации профиля капли на различных стадиях процесса ее роста.

Истечение магнитной жидкости из отверстия на неограниченную поверхность немагнитного контейнера происходило под действием силы тяжести. Получены зависимости объема отрывающейся капли магнитной жидкости от величины приложенного поля. В постоянном горизонтальном поле при напряженности 6,8 кА/м для магнитной жидкости с намагниченностью насыщения 50,9 кА/м наблюдалось увеличение объема оторвавшейся капли в 6 раз. В постоянном вертикальном поле объем отрывающейся капли уменьшался почти в 2 раза. Изменение объема наблюдалось и на двух других концентрациях магнитной жидкости (40,1 кА/м и 32,3 кА/м). Изменение объема капли при отрыве в магнитном поле объясняется изменением параметра смачивания основанием капли поверхности подвеса, за счет этого изменяется величина капиллярных сил, удерживающих каплю [4].

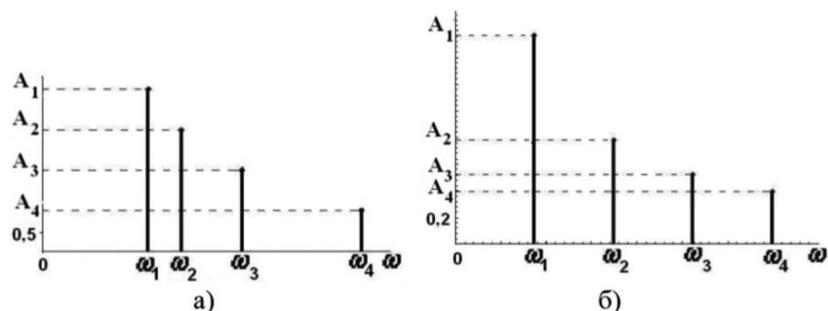


Рис. 7. Спектры колебаний, представленных на рис. 5, а и б, соответственно

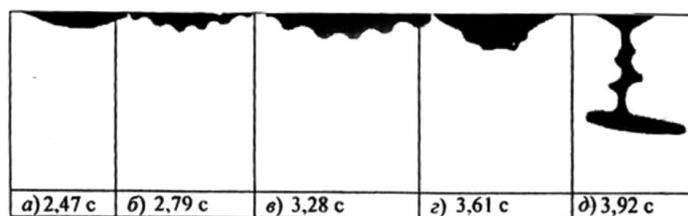


Рис. 8. Возникновение неустойчивости на поверхности капли при напряженности магнитного поля 9,5 кА/м при различных значениях времени

На рис. 8 представлена киногорамма капли, растущей и отрывающейся в горизонтальном переменном магнитном поле при напряженности магнитного поля 9,5 кА/м. Под каждым снимком приведено время регистрации данной формы капли, начиная от момента истечения капли. Из рисунка, видно, что при определенном, достаточно малом, объеме капли на ее поверхности не возникает явления неустойчивости. При достижении каплей определенного объема на поверхности капли начинается бежать волна, наблюдаемая в дальнейшем вплоть до отрыва капли. На момент отрыва капли (рис. 8, д) ее столбик получается ступенчатым с примерно одинаковой длиной ступени, а нижняя часть капли утрачивает осесимметричную форму, удлиняясь в направлении внешнего приложенного магнитного поля [5].

Экспериментальное наблюдение за поведением пузырьков газа, всплывающих в двухслойной среде магнитная – немагнитная жидкость показали, что траектория

всплытия этих пузырьков, при обеспеченных в экспериментах условиях, это движение по спирали с колебаниями горизонтальных осей пузырьков в вертикальной плоскости. Найдены спектры этих колебаний.

Наблюдение за истечением капли магнитной жидкости в переменном магнитном поле промышленной частоты показали, что при определенном объеме растущей капли, на ее поверхности образуется бегущая волна.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-01-00037).

Список литературы

1. Yanovskiy A.A., Simonovsky A.Ya., Kholopov V.L., Chuenkova I.Yu. Heat Transfer in Boiling Magnetic Fluid in a Magnetic Field // Solid State Phenomena. 2015. 233-234, 339-343.
2. Abdollahi A. Salimpour M.R., Etesami N. Experimental analysis of magnetic field effect on the pool boiling heat transfer of a ferrofluid // Appl Therm Eng. 2017. 111, 1101-1110.
3. Gogosov V.V., Simonovskii A.Ya., Smolkin R.D. Quenching and separation in magnetic fluids. JMMM. 1990. 85, 227-232.
4. Несис Е.И. Кипение жидкостей. М.: Наука, 1973. 280 с.
5. Розенцвейнг Р. Феррогидродинамика. М.: Мир, 1989. 356 с.