

УДК 532.3

ФОРМА ПОВЕРХНОСТИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ ВБЛИЗИ МАГНИТНЫХ ТЕЛ В ПОСТОЯННОМ И ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

© 2024 г. А. Я. Симоновский^{1, 2, *}, А. Р. Закинян²

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Ставропольский государственный аграрный университет», Ставрополь, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Северо-Кавказский федеральный университет», Ставрополь, Россия

*E-mail: simonovchki@mail.ru

Поступила в редакцию 22.01.2024

После доработки 29.04.2024

Принята к публикации 28.06.2024

Экспериментально исследована форма свободной поверхности магнитной жидкости, которую она принимает во внешнем однородном магнитном поле вблизи твердых магнитных тел. Изучена форма поверхности магнитной жидкости вблизи тел различной базовой геометрии: цилиндр, шар, пластина. Рассмотрена структура поверхности магнитной жидкости при воздействии стационарного и переменного магнитного поля. Показано, что форма поверхности существенно зависит от объема магнитной жидкости, геометрии магнитного тела и величины магнитного поля. Полученные результаты указывают на возможность целенаправленного контроля формы свободной поверхности магнитной жидкости, что может иметь практические приложения.

Ключевые слова: магнитная жидкость, форма свободной поверхности, постоянное магнитное поле, переменное магнитное поле, магнитное тело базовой геометрии

DOI: 10.31857/S0367676524100191, **EDN:** DSDNQZ

ВВЕДЕНИЕ

Магнитные жидкости представляют собой устойчивые коллоидные растворы однодоменных магнитных наночастиц в жидкой среде и сочетают выраженные магнитные свойства со способностью сохранять текучесть во внешнем магнитном поле [1]. Одним из наиболее впечатляющих проявлений свойств магнитных жидкостей является изменение формы их поверхности при воздействии внешнего магнитного поля. Существуют многочисленные исследования формы свободной поверхности магнитной жидкости под действием однородного и неоднородного магнитного поля в различных пространственных геометриях задачи [2–4].

Динамика течения и стационарная геометрия свободной поверхности магнитной жидкости приобретают сложный и нетривиальный характер в случае, когда приложенное магнитное поле дополнительно искажается наличием твердых магнитных тел. Исследовались формы свободной поверхности магнитной жидкости в магнитном поле вблизи магнитных тел различной геометрии (шар, цилиндр, спираль и др.) [5–9]. Помимо визуальной привлекательности данные задачи имеют практическое значение для таких приложений и устройств как клапаны, насосы, дозаторы,

датчики, уплотнения, системы искусственных двигателей [10–12] и др. Кроме этого, такие исследования представляют интерес в контексте возможности применения магнитной жидкости в качестве закалочной среды [13–15].

Перечисленные приложения диктуют потребность исследования поведения свободной поверхности магнитной жидкости вблизи магнитных тел различной формы. В частности, представляет интерес рассмотрение различных базовых геометрий таких тел. В данной работе рассматривается форма свободной поверхности магнитной жидкости вблизи магнитных шара, цилиндра и пластины во внешнем однородном магнитном поле. Такая геометрия магнитных тел частично рассматривалась ранее в существующих исследованиях, однако ряд аспектов проблемы остается невыясненным. В частности, недостаточно исследованным является влияние объема магнитной жидкости, контактирующей с магнитным телом, на закономерности трансформации ее свободной поверхности. Кроме этого, в отличие от существующих исследований, в данной работе будет изучено изменение формы свободной поверхности магнитной жидкости как в стационарном, так и в переменном магнитном поле.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Измерительная ячейка представляла собой вертикальную цилиндрическую кювету, выполненную из немагнитного материала. Ячейка устанавливалась между полюсами электромагнита, как показано на рис. 1. Внутри ячейки помещались магнитные тела различной формы (цилиндр, шар, пластина), выполненные из среднеуглеродистой стали. В межполюсном пространстве электромагнита создавалось однородное магнитное поле. Магнитное поле могло быть постоянным, а также переменным с частотой 50 Гц и с варьируемой величиной напряженности. Верхняя и нижняя части кюветы были выполнены из стекла. При включенном магнитном поле на поверхность магнитного тела подавалась последовательно увеличивающаяся порция магнитной жидкости. Характер распределения магнитной жидкости регистрировался фотокамерой путем фиксации отраженного от свободной поверхности жидкости света. Различные элементы возмущенной поверхности жидкости соответствующим образом отражали свет, в результате наблюдалась картина из бликов, характеризующая форму свободной поверхности.

Магнитный цилиндр устанавливался вертикально в центр кюветы и имел диаметром 10 мм и высоту 20 мм. Магнитный шар имел диаметр 22.5 мм. Также исследовалось распределение свободной поверхности магнитной жидкости, окружающей пластины различных размеров: короткие, когда отношение длины пластины L к ее толщине t меньше 10, и длинные, когда отношение $L/t > 10$. Наибольшая сторона пластины располагалась параллельно вектору приложенного магнитного поля. Размеры короткой пластины: длина $L = 20$ мм, высота $H = 15$ мм и толщина $t = 3$ мм. Размеры длинной пластины: длина $L = 75$ мм, высота $H = 15$ мм и толщина $t = 3$ мм.

В экспериментах применялась магнитная жидкость на основе керосина с наночастицами магнетита, стабилизированными олеиновой

кислотой. Плотность магнитной жидкости составляла 1200 кг/м^3 , начальная магнитная восприимчивость 0.6.

ПОСТОЯННОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

На рис. 2а, представлена фотография (вид сбоку) цилиндрического образца, окруженного малым (0.8 см^3) объемом магнитной жидкости при напряженности внешнего магнитного поля $H_0 = 79.6 \text{ кА/м}$. Вектор магнитного поля на рис. 2а направлен слева направо. Пунктиром на рисунке изображено положение магнитного цилиндра, темная область пространства вокруг него занята магнитной жидкостью, светлая область пространства свободна от магнитной жидкости. На рис. 2б представлена фотография распределения магнитной жидкости объемом 44 см^3 вокруг цилиндра. На фотографиях видно, что малый объем магнитной жидкости располагается вдоль участков поверхности цилиндра, где угол между направлением магнитного поля и нормалью к поверхности цилиндра близок к 0 или 180° (левая и правая части цилиндрического образца на рис. 2). Участки поверхности цилиндра, свободные от магнитной жидкости, сужаются в направлении силы тяжести. При этом магнитная жидкость располагается по высоте

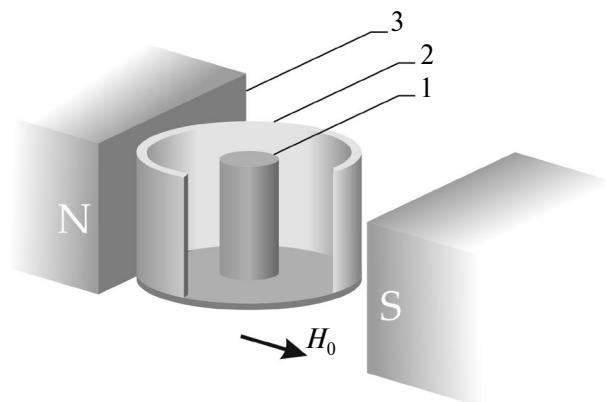


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — магнитное тело, 2 — кювета, заполняемая магнитной жидкостью, 3 — полюса электромагнита.

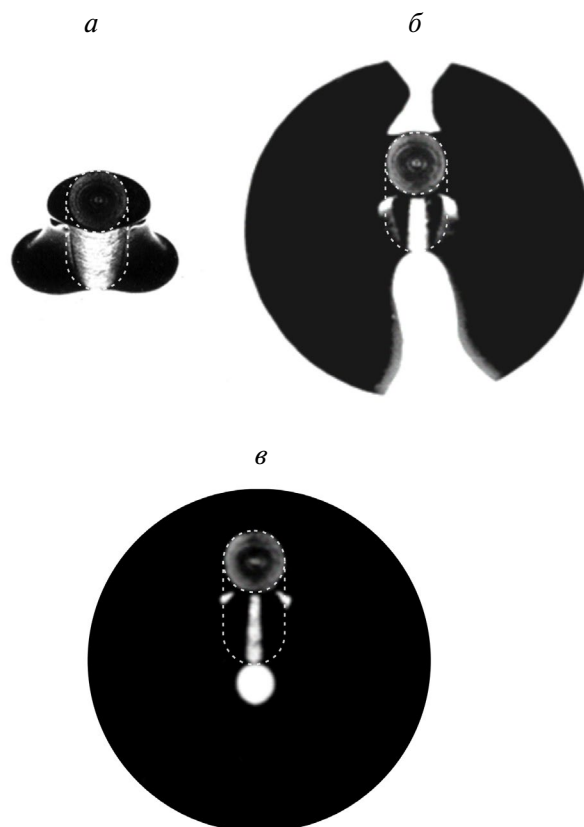


Рис. 2. Равновесная форма свободной поверхности магнитной жидкости вблизи магнитного цилиндра (пояснения в тексте).

цилиндра так, что сечение ее объема плоскостью, перпендикулярной оси цилиндра, увеличивается в направлении силы тяжести.

Увеличение содержания магнитной жидкости в ячейке приводит к замыканию ее объема и образованию двух отдельных воздушных полостей, расположенных на противоположных сторонах цилиндра. На рис. 2в приведена фотография формы свободной поверхности магнитной жидкости, когда ее суммарный объем равен 76 см^3 . Овальное белое пятно на рис. 2в представляет собой изображение одной из воздушных полостей в объеме магнитной жидкости на дне кюветы.

Наблюдения показали, что дальнейшее увеличение объема магнитной жидкости в кювете приводит к сужению просвета полости в придонной части кюветы и увеличению высоты уровня жидкости в областях, удаленных от цилиндра. Существует некоторое критическое значение объема жидкости, при котором белые пятна, изображенные на рис. 2в, исчезают. При этом воздушные полости принимают вид расширяющихся снизу вверх воронок конусообразной формы с вершинами на дне кюветы. Еще большее увеличение объема жидкости приводит к их вырождению. С увеличением напряженности магнитного поля воронки вновь возникают и их объем возрастает с увеличением интенсивности поля.

В условиях, аналогичных описанным для цилиндра, наблюдалось распределение свободной поверхности магнитной жидкости в окрестности

намагничивающегося шара. Эксперименты показали, что малые объемы магнитной жидкости сосредотачиваются на полюсах шара в виде эллипсоидальных образований (рис. 3а и 3б). Свободная от магнитной жидкости экваториальная область поверхности шара имеет форму кольца. На рис. 3а, б представлены фотографии шара, окруженного малыми (0.4 и 0.56 см^3) объемами магнитной жидкости при напряженности внешнего магнитного поля $H_0 = 79.6 \text{ кА/м}$. Плоскость фотографии совпадает с плоскостью горизонта. Отметим, что эллипсоидальные образования не касаются дна кюветы, нависая над ним. При увеличении объема магнитной жидкости до 15 см^3 эллипсоидальные образования, увеличиваясь в объеме, начинают касаться дна кюветы, формируя полости подковообразной формы на дне кюветы в окрестности экватора шара в вертикальном его сечении, как показано на рис. 3в. При дальнейшем увеличении объема магнитной жидкости, окружающей шар, до 40 см^3 (рис. 3г) на дне кюветы формируются эллипсоидальной формы полости — светлые зоны в верхней и нижней частях рис. 3г.

В условиях эксперимента, описанного ранее в случае цилиндра и шара, были исследованы фигуры равновесия магнитной жидкости в окрестности намагничивающейся пластины. На рис. 4а и 4б показаны фотографии короткой пластины (вид сверху — рис. 4а, вид сбоку — рис. 4б), окруженной малым объемом магнитной жидкости 2.3 см^3 . Видно, что малый объем магнитной жидкости скапливается у торцов пластины

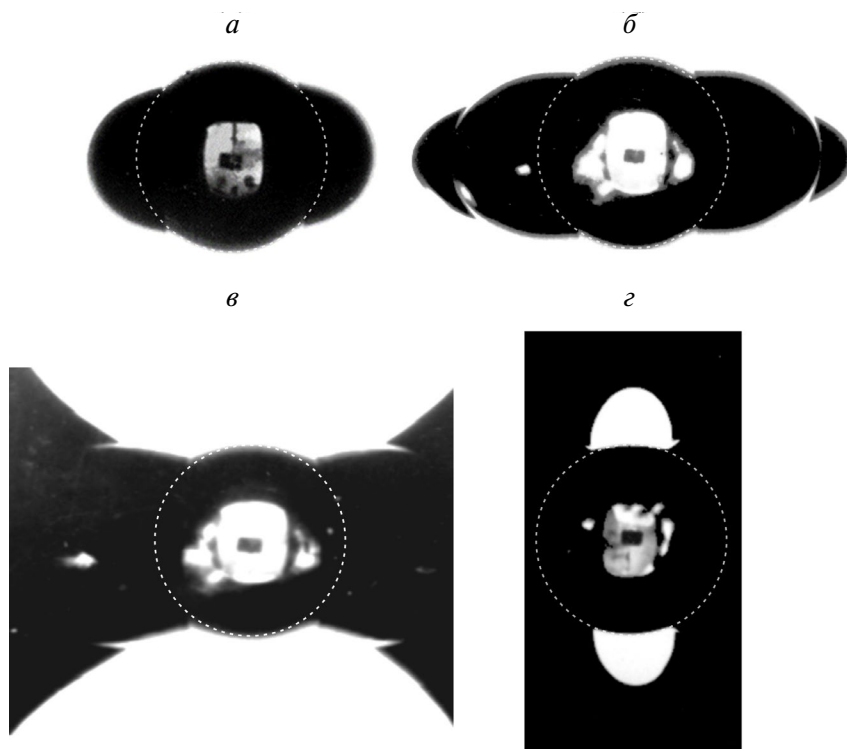


Рис. 3. Равновесная форма свободной поверхности магнитной жидкости вблизи магнитного шара (пояснения в тексте).

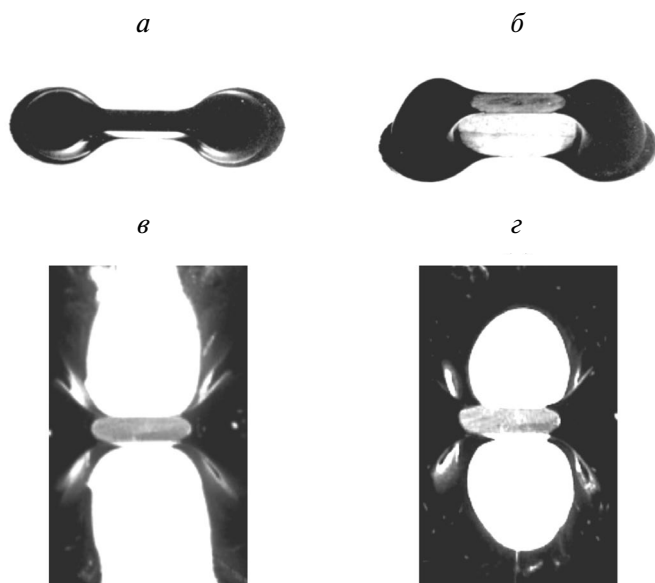


Рис. 4. Равновесная форма свободной поверхности магнитной жидкости вблизи короткой магнитной пластины (пояснения в тексте).

в виде капель. Видно также некоторое натекание жидкости на верхнюю грань пластины. Горизонтальное сечение свободной поверхности магнитной жидкости вблизи боковых концов пластины (рис. 4а) имеет форму эллипсов с большой осью, направленной вдоль магнитного поля. Каплевидные образования магнитной жидкости на концах пластины расширяются в направлении силы тяжести. Магнитная жидкость начинает растекаться по дну кюветы в виде областей эллиптической формы (рис. 4б). На рис. 4в приведена фотография пластины, окруженной магнитной жидкостью с суммарным объемом 86 см^3 . При таком объеме магнитная жидкость на дне кюветы слева и справа от пластины растекаются до границ кюветы, оставляя зоны эллиптической формы, свободные от магнитной жидкости. Это светлые области в верхней и нижней частях фотографии. С увеличением суммарного объема магнитной жидкости в кювете до 106 см^3 (рис. 4г) на дне кюветы левый и правый объемы жидкости соединяются. При этом в результате суммарного объема магнитной жидкости в окрестности центральной части пластины образуются две воздушные полости, по одной на каждой стороне пластины. В эксперименте видно, что образовавшиеся воздушные полости имеют форму конусообразных воронок, сужающихся в направлении силы тяжести от верхней свободной поверхности магнитной жидкости до дна кюветы.

На рис. 5а приведена фотография длинной пластины, окруженной малым суммарным объемом (3 см^3) магнитной жидкости (вид сбоку). Магнитная жидкость, как и в случае короткой пластины, собирается у торцов пластины, растекаясь по всей ее высоте. При доведении суммарного объема магнитной жидкости

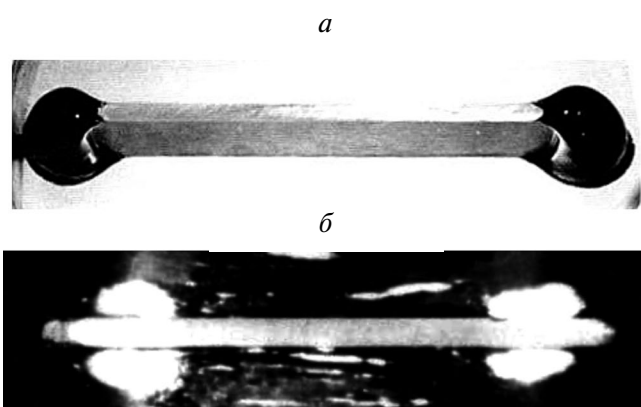


Рис. 5. Равновесная форма свободной поверхности магнитной жидкости вблизи длинной магнитной пластины (пояснения в тексте).

до 73 см^3 (рис. 5б) жидкость касается центральной части поверхности пластины. При этом в окрестности торцов пластины формируются четыре воздушные полости — по две на каждую сторону пластины. Полости имеют вид конусообразных воронок, сужающихся в направлении силы тяжести от верхней границы магнитной жидкости до дна кюветы. Описанные эксперименты показывают, что характер распределения магнитной жидкости вблизи поверхности пластины существенно зависит от размеров пластины.

ПЕРЕМЕННОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Как и в экспериментах в постоянном магнитном поле, при использовании переменного магнитного поля магнитные тела (цилиндр, шар, пластина) поочередно устанавливались в центр кюветы в межполюсное пространство электромагнита. Напряженности внешнего магнитного поля составляла $H_0 = 79.6 \text{ кА/м}$. Было обнаружено, что при малых объемах магнитной жидкости в кювете наблюдается картина свободной поверхности, аналогичная случаю стационарного магнитного поля. С ростом объема магнитной жидкости, когда его правая и левая части замыкаются, на свободной поверхности магнитной жидкости возникают волнообразные возмущения, формирующие динамические структуры поверхности. При этом наблюдается циркуляционное движение жидкости в объеме кюветы, направленное от центральных областей к периферии. Распространяющиеся на свободной поверхности магнитной жидкости волновые возмущения образуют различные формы поверхности в зависимости от геометрии магнитного тела и объема магнитной жидкости.

Результаты экспериментов представлены на следующих рисунках. На рис. 6а-6г представлены динамические структуры поверхности магнитной жидкости, полученные вблизи вертикального намагничивавшегося цилиндра. На рис. 7а-7г показаны динамические структуры поверхности магнитной жидкости,

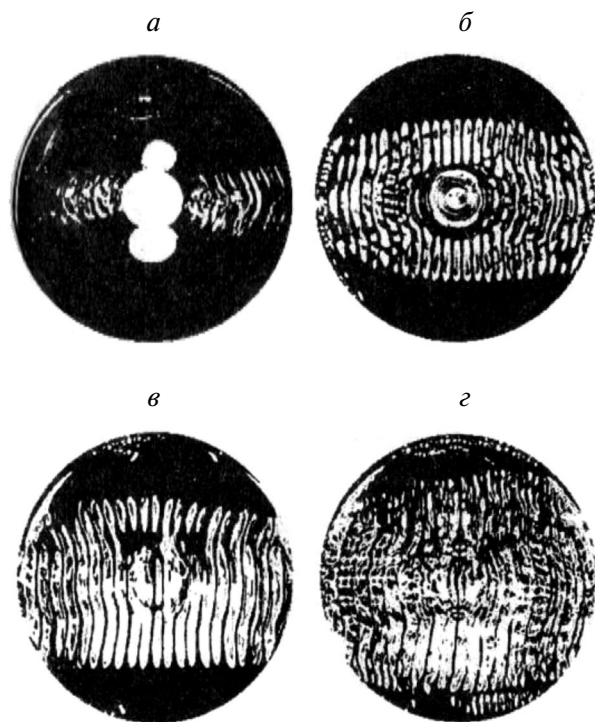


Рис. 6. Динамическая структура свободной поверхности магнитной жидкости в переменном магнитном поле в окрестности магнитного цилиндра (пояснения в тексте).

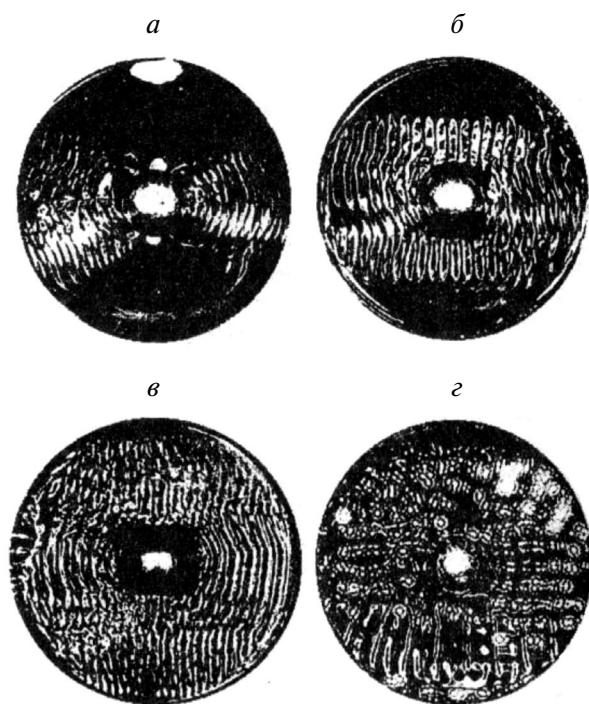


Рис. 7. Динамическая структура свободной поверхности магнитной жидкости в переменном магнитном поле в окрестности магнитного шара (пояснения в тексте).

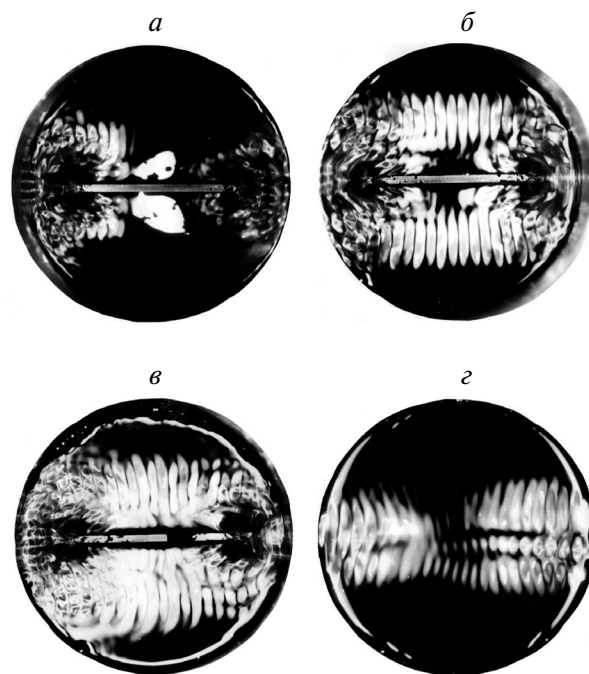


Рис. 8. Динамическая структура свободной поверхности магнитной жидкости в переменном магнитном поле в окрестности магнитной пластины (пояснения в тексте).

полученные вблизи шара. На рис. 8а-8г — динамические структуры, полученные вблизи пластины. В центре рисунков виден образец. На рис. 6—8 буквами от а до г помечены фотографии динамических структур поверхности магнитной жидкости, полученные при различных объемах магнитной жидкости в кювете: — 10.9 (а); 31.3 (б); 51.3 (в); 171.3 см³ (г). В случае, когда магнитная жидкость полностью покрывает магнитное тело, дальнейшее увеличение объема магнитной жидкости в кювете приводит к тому, что амплитуда волновых возмущений свободной поверхности начинает убывать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены новые сведения о форме свободной поверхности магнитной жидкости при наличии в системе магнитных твердых тел различной геометрии. Показано, что равновесная форма поверхности магнитной жидкости существенно зависит от объема магнитной жидкости, а от также геометрии магнитного тела и напряженности приложенного магнитного поля. Обнаружено возникновение динамических структур свободной поверхности магнитной жидкости в переменном магнитном поле, зависящих от геометрии магнитного тела, а также определяемых объемом магнитной жидкости. Полученные результаты могут рассматриваться в качестве модельных, так как в работе использованы магнитные тела базовых форм.

Результаты работы могут быть полезны при исследовании поведения магнитных жидкостей в условиях более сложной пространственной геометрии задачи.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования Северо-Кавказского федерального университета при финансовой поддержке Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RF-2296.61321X0029, соглашение № 075-15-2021-687).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гареев К.Г., Непомнящая Э.К.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 7. С. 990; *Gareev K.G., Nepomnyashchaya E.K.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 7. P. 904.
2. *Richter R., Lange A.* // In: Lecture Notes on Physics. V. 763. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.
3. *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'deshov E.V. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 3. P. 295.
4. *Zakinyan A., Mkrtychyan L., Dikansky Y.* // Eur. J. Mech. B. 2016. V. 56. P. 172.
5. *Gogosov V.V., Grishanina O.A., Kiryushin V.V., Simonovskii A.Ya.* // Magnetohydrodynamics. 1998. V. 34. P. 35.
6. *Naletova V.A., Turkov V.A., Pelevina D.A. et al.* // J. Magn. Magn. Mater. 2012. V. 324. P. 1253.
7. *Bashtovoi V., Motsar A., Naletova V. et al.* // Magnetohydrodynamics. 2013. V. 49. P. 592.
8. *Sharova O.A., Merkulov D.I., Pelevina D.A. et al.* // Phys. Fluids. 2021. V. 33. Art. No. 087107.
9. *Huang L., Hädrich T., Michelsacm D.L.* // Trans. Graph. 2019. V. 38. P. 93.
10. *Ando B., Ascia A., Baglio S., Pitrone N.* // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2009. V. 58. P. 3232.
11. *Greivell N.E., Hannaford B.* // IEEE Trans. Biomed. Eng. 1997. V. 44. P. 129.
12. *Sun R., Li D.* // J. Magn. Magn. Mater. 2020. V. 497. Art. No. 165960.
13. *Gogosov V.V., Simonovskii A.Ya., Smolkin R.D.* // J. Magn. Magn. Mater. 1990. V. 85. P. 227.
14. *Khoshmehr H.H., Saboonchi A., Shafii M.B., Jahani N.* // Appl. Therm. Eng. 2014. V. 64. P. 331.
15. *Kole M., Khandekar S.* // J. Magn. Magn. Mater. 2021. V. 537. Art. No. 168222.

Shape of magnetic fluid surface near magnetic bodies in constant and alternating magnetic field

A. Ya. Simonovsky^{1, 2, *}, A. R. Zakinyan¹

¹North Caucasus Federal University, Stavropol, 355017 Russia

²Stavropol State Agrarian University, Stavropol, 355017 Russia

*e-mail: simonovchkij@mail.ru

The shape of the free surface of a magnetic fluid, which it takes in an external homogeneous magnetic field near solid magnetic bodies, is experimentally investigated. The shape of the magnetic fluid surface in the vicinity of bodies of different basic geometry: cylinder, ball, plate is studied. The pattern of the magnetic fluid surface under the influence of a stationary and alternating magnetic field is considered. It is shown that the shape of the surface essentially depends on the volume of the magnetic fluid, the geometry of the magnetic body and the magnitude of the magnetic field. The obtained results indicate the possibility of purposeful control of the shape of the free surface of magnetic fluid, which may have practical applications.

Keywords: magnetic fluid, free surface shape, constant magnetic field, alternating magnetic field, magnetic body of basic geometry.