

УДК 536.242

## ГИДРОСТАТИКА МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИНЫ. ЭКСПЕРИМЕНТ И ТЕОРИЯ

**Бавинов М.А., Милостивая В.В., Гришанина О.А.,  
Симоновский А.Я.**

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

Экспериментально и теоретически изучены равновесные формы свободной поверхности магнитной жидкости вблизи поверхности ферромагнитной пластины, помещенной в однородное внешнее магнитное поле. Показано, что распределение магнитной жидкости вблизи пластины зависит от соотношения размеров поперечного сечения пластины, а также соотношения объема магнитной жидкости, окружающей пластину, к объему самой пластины. Вблизи центральной части «короткой» пластины в объеме магнитной жидкости образуются две конусообразных полости по обе стороны пластины. Вблизи торцов «длинной» пластины образуются по две конусообразных полости по обе стороны каждого торца пластины. Распределение свободной поверхности магнитной жидкости вблизи «длинной» пластины, с выполненным вдоль ее вертикальной оси симметрии отверстием, превращающим пластину в составную из двух «коротких» таково – вблизи поверхности этой пластины в объеме магнитной жидкости формируются уже восемь воздушных полостей. Образование описанных полостей наблюдаемых в экспериментах моделировалось математическими методами теории функций комплексного переменного.

**Ключевые слова:** магнитная жидкость, гидростатика, гидродинамика, математическая модель

## HYDROSTATICS OF THE MAGNETIC LIQUID NEAR THE SURFACE OF THE PLATE. EXPERIMENT AND THEORY

**Bavinov M.A., Milostivaya V.V., Grishanina O.A.,  
Simonovsky A.Y.**

*Stavropol State Agrarian University, Stavropol, e-mail: inf@stgau.ru,  
vika.milostivaya@yandex.ru*

The equilibrium forms of magnetic fluid free surface near ferromagnetic plate surface in uniform external magnetic field are studied experimentally and theoretically. It is shown that the distribution of the magnetic fluid near the plate depends on the cross section ratio dimensions of the plate and also the ratio of the magnetic fluid volume surrounding the plate to the volume of the plate. Two cone-shaped cavities are formed in magnetic fluid near the central part of the «short» plate on both sides of the plate. Two conical cavities are formed on both sides of the plate near the ends of the «long» plate. The distribution of the magnetic fluid surface near the «long» plate with the hole along its vertical axis of symmetry turning the plate into a composite of two «short» ones, is so that eight air cavities are formed in magnetic fluid near the plate surface. The formation of the described cavities observed in experiments was modeled by complex functions method.

**Keywords:** magnetic fluid, hydrostatics, hydrodynamics, mathematical model

Ферромагнитная пластина устанавливалась вертикально в немагнитной цилиндрической кювете в полюса электромагнита. К поверхности пластины при включенном магнитном поле подавались последовательно увеличивающиеся порции магнитной жидкости. Равновесные формы свободной поверхности магнитной жидкости регистрировались фотокамерой. Намагниченность насыщения магнитной жидкости составляла 20,4 кА/м. Равновесные конфигурации свободной поверхности магнитной жидкости изучались в зависимости от соотношения размеров пластины, величины прикладываемого магнитного поля и для различной ориентации пластины по отношению к направлению внешнего магнитного поля.

Для изучения изменений в поведении магнитной жидкости вблизи поверхности

пластины при изменении размеров пластины проводили следующий эксперимент. Были изготовлены образцы пластин с одинаковой толщиной, высотой, но различной длины. Толщина  $t$  пластин составляла 3 мм, высота  $h$  равнялась 15 мм. Длина  $L$  пластины изменилась в следующих пределах: от длины  $L$ , равной толщине пластины, до размеров, когда отношение длины пластины к толщине было гораздо более одного порядка. Показано, что характер распределения магнитной жидкости вблизи поверхности пластины существенно зависит от соотношения размеров пластины. На рис.1 представлена характерная картина распределения свободной поверхности магнитной жидкости вблизи поверхности пластины с соотношением длины  $L$  к толщине  $t$  меньше 10.

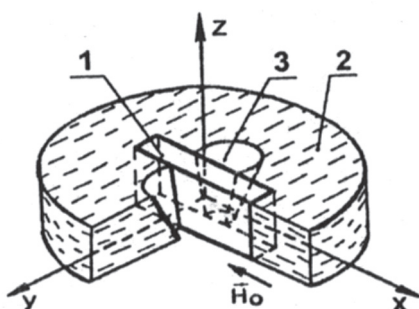


Рис. 1. Распределение свободной поверхности магнитной жидкости вблизи «короткой» пластины

Видно, что в объеме магнитной жидкости, омывающей поверхности стены, образуются две воздушные полости. Полости представляют собой своеобразные вертикальные воздушные воронки, сужающиеся в направлении тяжести. Располагаются воронки по обе стороны пластины вдоль оси симметрии плоскости пластины.

На рис.2 представлена характерная картина распределения магнитной жидкости вблизи поверхности пластины с соотношением длины  $L$  к толщине  $t$ :  $L/t \gg 10$ . Видно, что в объеме магнитной жидкости образуются четыре воздушные полости. Воронки расположены симметрично относительно оси симметрии плоскости пластины. Однако, прилегают они не к центральной части поверхности пластины, а сформированы вблизи торцов пластины.

При соотношении к толщине пластины порядка десяти ( $L/t \sim 10$ ) наблюдалось промежуточное состояние, заключающееся в следующем. Две воздушные полости вблизи поверхности пластины, которые для пластины соотношением  $L/t < 10$  имели строгое эллипсоидальное очертание в поперечном сечении, теряли свою строгую форму. При этом с увеличением длины пластины магнитная жидкость в средней части границы раздела жидкость-воздушная полость свободно подтекала к поверхности пластины. Это подтекание магнитной жидкости к поверхности пластины приводило к разделению изначально одной воздушной полости на две части, которые в свою очередь смещались от центральной области к её торцам. Такой характер распределения свободной поверхности магнитной жидкости наблюдался в приложенном внешнем магнитном поле величиной 83 кА/м.

Изучался вопрос о влиянии величины внешнего магнитного поля на характер фор-

мирования свободной поверхности магнитной жидкости вблизи поверхности пластин с различным соотношением длины к толщине.

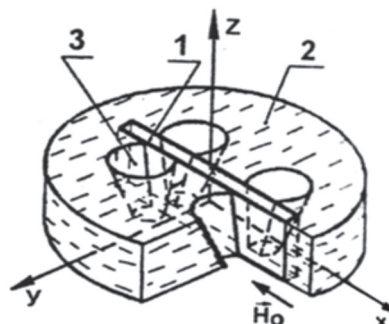


Рис. 2. Распределение свободной поверхности магнитной жидкости вблизи «длинной» пластины

Эксперименты показали, что вблизи поверхности пластин с соотношением  $L/t < 10$  во всем исследуемом интервале величины внешнего приложения магнитного поля образуются только две воздушные полости, схема расположения которых соответствует приведенной на рис. 1. Вблизи поверхности пластины с соотношением  $L/t \gg 10$  во всем исследованном интервале величины внешнего магнитного поля образуются четыре воздушные полости, схема расположения которых соответствует приведенной на рис.2. Вблизи поверхности пластин с соотношением ширины к толщине порядка десяти (исследованная пластина имела размеры  $65 \times 8 \times 15$  мм) с изменением величины внешнего магнитного поля наблюдалась следующая картина распределения свободной поверхности магнитной жидкости. В большом поле ( $H \sim 10^2$  кА/м) вблизи поверхности пластины образовались четыре воздушные полости в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2. В магнитном поле величиной  $H \sim 10^2$  кА/м магнитная жидкость, свободно поле омывающая центральную часть поверхности пластины, оттекала от поверхности пластины. При этом четыре полости правильной геометрической формы объединялись в две полости с несформировавшимися границами. Наконец, в полях величиной  $H \sim 10^2$  кА/м вблизи поверхности пластины формировались две воздушные полости, расположенные в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1. Полости имели эллипсоидальную форму в поперечном сечении, носящую устойчивый характер.

Изучался вопрос влияния высоты пластины на характер формирования воздушных полостей в магнитной жидкости вблизи поверхности пластины. В пределах исследованных высот пластины (от высоты, равной толщине пластины, до высоты, на порядок превышающей толщину пластины) характер образования воздушных полостей, описанный выше, не изменялся.

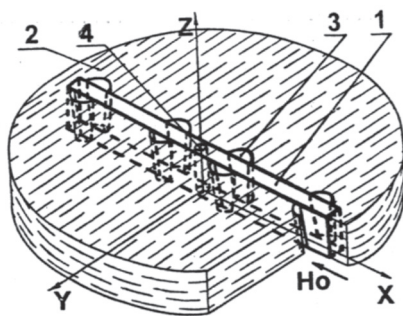


Рис. 3. Распределение свободной поверхности магнитной жидкости с отверстием

Вышеизложенные измерения проводились на сплошной ферромагнитной пластине. Эксперименты показали, что нарушение сплошности пластины может существенно изменить характер формирования воздушных полостей вблизи поверхности пластины. В пластине размерами равными 70x3 x35 мм, было проделано отверстие диаметром 1,2 мм. Отверстие было выполнено вдоль оси симметрии пластины. Осевая линия цилиндрического отверстия располагалась параллельно плоскостям пластины. Картина распределения свободной поверхности магнитной жидкости вблизи поверхности такой пластины представлена на рис. 3. Видно, что вблизи поверхности этой пластины в объеме магнитной жидкости формируются уже восемь воздушных полостей.

Для выяснения физической картины наблюдаемых явлений проводились эксперименты по моделированию распределения силовых линий магнитного поля вблизи поверхности пластины. Для визуализации силовых линий магнитного поля применялись магниточувствительные эмульсии, представляющие собой мелкодисперсную взвесь капель магнитной жидкости в прозрачном наполнителе. Эксперименты показали, что для пластины с соотношением  $L/t < 10$  вблизи плоскостей пластины действуют большие

градиенты магнитного поля, направленные к полюсам (торцам) пластины, что вызывает действие пондеромоторных сил на магнитную жидкость. Пондеромоторные силы оттягивают жидкость от центра и части плоскостей пластины к ее торцам и приводят к возникновению вблизи этих областей пластины двух полостей в объеме магнитной жидкости, омывающей пластину. В случае пластин с соотношением  $L/t \gg 10$  градиенты магнитного поля возникают лишь в непосредственной близости к торцам пластины. Однородное магнитное поле в центральной области плоскостей пластины позволяет магнитной жидкости свободно омывать эту часть поверхности пластины, что и вызывает образование четырех воздушных полостей вблизи торцов пластины и к свободному омыванию жидкостью основной части поверхности плоскостей пластины.

Дается объяснение причине возникновения восьми воздушных полостей вблизи пластины с отверстием. Отверстие диаметром, сравнимым с толщиной пластины, фактически разрезает ее на две равные половины. Каждая половина пластины во внешнем магнитном поле представляет собой плоский диполь с характеристик  $L/t \gg 10$ . Поэтому магнитная жидкость, омывающая поверхности спаренных плоских диполей, отстоящих друг от друга на расстоянии, равном диаметру отверстия вблизи каждого из них ведет себя таким же образом, как и вблизи поверхности одинарной пластины с соотношением  $L/t \gg 10$ . Это обстоятельство и приводит к образованию уже не четырех, а восьми воздушных полостей в объеме магнитной жидкости, омывающей поверхности пластины.

Проводился анализ влияния ориентации пластины по отношению к направлению внешнего приложенного магнитного поля на характер формирования воздушных полостей в объеме магнитной жидкости вблизи поверхности пластины. Эксперименты показали, что при расположении плоскости пластины под углом  $45^\circ$  по отношению к направлению внешнего приложенного магнитного поля в объеме магнитной жидкости, омывающей пластину, возникает только две полости во всем исследованном интервале соотношений длины к толщине пластины. Расположены эти полости у торцов пластины по одной на каждую плоскость (сторону) пластины.

Дается объяснение этому явлению. При повороте плоскости пластины по отношению к направлению внешнего магнит-

ного поля на угол  $45^\circ$  происходит уменьшение длины плоского диполя, отсчитанной вдоль направления приложенного внешнего магнитного поля. Это оказывается равнозначным уменьшению соотношения длины к толщине пластины.

Проводился теоретический анализ формы свободной поверхности магнитной жидкости вблизи поверхности пластины. Магнитное поле  $H$  пластины с бесконечной магнитной проницаемостью во внешнем однородном параллельном пластине магнитном поле  $H_0$ , как обычно, определяется из выражения

$$H = \Delta\phi. \quad (1)$$

Потенциал магнитного поля  $\phi$  может быть представлен в виде вещественной части комплексной функции  $\Phi$ , то есть как  $\phi = \text{Re}\Phi$ . Используя функцию Жуковского для конформного преобразования, функцию  $\Phi$  запишем в виде:

$$\Phi = \frac{H_0 L}{2} \left[ z + \sqrt{z^2 - 1} - \frac{1}{z + \sqrt{z^2 - 1}} \right] \quad (2)$$

Здесь  $z = x + iy$ ;  $L$  – длина пластины.

Условие равновесия свободной поверхности магнитной жидкости задается уравнением

$$-\nabla p + (M\nabla)H = 0. \quad (3)$$

Здесь  $p$  – давление;  $M$  – намагниченность магнитной жидкости. Силой тяжести пренебрегается.

Условия непрерывности нормальной компоненты тензора напряжений свободной поверхности магнитной жидкости приводит к соотношению

$$p - p_a = 2\pi M_n. \quad (4)$$

Здесь  $p$  – давление в магнитной жидкости,  $p_a$  – давление воздуха,  $M_n$  – нормальная компонента намагниченности на свободной поверхности магнитной жидкости. Поверхностное натяжение не учитывается.

Из соотношений (3) и (4) следует, что на свободной поверхности магнитной жидкости выполняется условие

$$\int_0^H M dH + 2\pi M_n^2 = \text{const}. \quad (5)$$

Если намагниченность жидкости  $M_n$  мала по сравнению с внешним полем  $H_0$  вторым слагаемым в формуле (5) можно пренебречь по сравнению с первым. В результате, в этом приближении линии свободной поверхности магнитной жидкости совпадают с линиями постоянства модуля напряженности магнитного поля. В результате дифференцирования по формуле (1) для квадрата модуля магнитного поля пластины получим выражение

$$|H|^2 = \frac{x^2 + y^2}{\sqrt{(x^2 - y^2 - 1)^2 + 4x^2 y^2}} = \text{const} \quad (6)$$

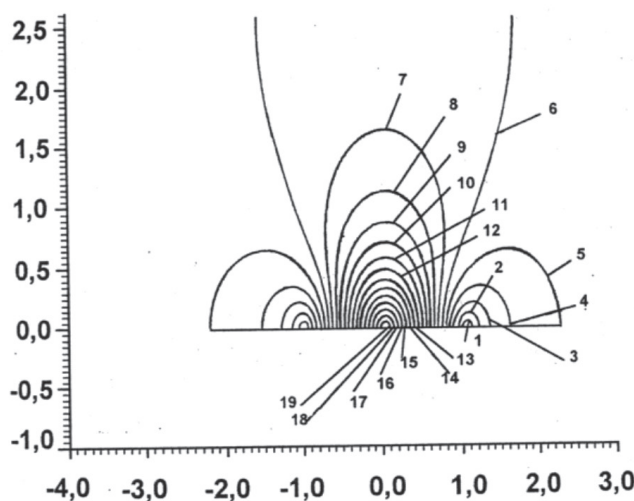


Рис. 4. Графики распределения границ раздела магнитная – немагнитная среда



На рис. 4 изображены линии постоянства модуля поля  $|H|$ , описываемые формулой (6). Расположение кривых 1–5, окружающих симметрично два торца пластины, соответствует расположению свободной поверхности малых объемов магнитной жидкости вблизи поверхности пластины, наблюдаемых в экспериментах с пластинами при соотношении  $L/t < 10$ . Последующие кривые на рис. 4 соответствуют экспериментально наблюдаемому распределению свободной поверхности магнитной жидкости при больших объемах магнитной жидкости, заполнявшей кювету и окружающей поверхность пластины. Эти кривые описывают воздушные полости вблизи центральной части поверхности пластины. Воздушные полости, как следует из рис. 4, уменьшаются в объеме с увеличением объема магнитной жидкости, окружающей поверхность пластины. Константу уравнения (6), таким образом, можно интерпретировать как величину, связанную с объемом магнитной жидкости. Расчеты показывают, что уменьшение константы уравнения (6) соответствует увеличению объема магнитной жидкости.

Таким образом, экспериментально и теоретически показано, что распределение намагничивающейся жидкости вблизи поверхности магнитной пластины происходит по следующему закону. У центра «короткой» пластины в объеме магнитной жидко-

сти формируется воздушная полость конусообразно сужающаяся в направлении силы тяжести с обеих сторон пластины. Вблизи поверхности «длинной» пластины образование подобных полостей происходит у торцов по обе стороны пластины. Некоторые из обсуждаемых здесь вопросах рассматривались в статьях [1...8].

*Выражаем благодарность РФФИ за финансовую поддержку (Грант № 17-01-00037).*

#### Список литературы

1. Фертман В.Е. Магнитные жидкости: Справочное пособие. – Минск: Высш. шк., 1988. – 184 с.
2. Такетоми С., Тикадзуми С. Магнитные жидкости / Пер. с японск. – М.: Мир, 1993. – 272 с.
3. Розенцвейг Р.Е. Феррогидродинамика: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 356 с., ил.
4. АС №985076 СССР. Закалочная среда. / Ставропольский пединститут: авторы изобретения В.В. Чеканов, А.Я. Симоновский. – Заявл. 26.05.81, №3294878/22-02; опубл. 30.12.82 // Б.И., 1982, №48
5. Магнитные жидкости в машиностроении / Д.В. Орлов, Ю.О. Михалев, Н.К. Мышкин и др.: под общ. ред. Д.В. Орлова, В.В. Подгоркова. – Машиностроение. 1993. – 272 с.
6. Гришанина О.А., Симоновский А.Я. Проблемы тепло- и массопереноса в нанодисперсных магнитных жидкостях. – Ставрополь: СевКавГТУ, 2010. – 296 с. ISBN № 978-5-9296-0524-6.
7. Кобозев М.А., Симоновский А.Я., Яновский А.А. Гидрогазодинамика процесса кипения магнитной жидкости в магнитном поле: монография / LAP. – 105 с. ISBN № 978-620-2-05263-4.
8. Симоновский А.Я., Яновский А.А. Теплообмен в кипящей магнитной жидкости. / LAP. – 148 с. ISBN: 978-3-659-90834-7.