

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-150-163>



Форма и устойчивость локального теплопередающего магнитожидкостного покрытия на пластине

А. А. Залетило¹, А. Г. Рекс¹ ✉

¹ Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, д. 65, г. Минск 220013, Республика Беларусь

✉ e-mail: agreks@tut.by

Резюме

Цель. Исследовать форму и устойчивость магнитожидкостного покрытия на плоской поверхности в неоднородном магнитном поле постоянного магнита.

Методы. В экспериментах использованы магнитные жидкости на основе трансформаторного масла ММТ-44 и ММТ-21 с намагниченностью насыщения соответственно 43,8 и 21,2 кА/м. Магнитожидкостное покрытие формировалось на поверхности горизонтальной и вертикальной немагнитных пластин в локально неоднородном магнитном поле постоянных магнитов. Источник неоднородного магнитного поля – система из двух магнитов прямоугольной формы. Размер магнитной системы 40×12×10 мм. Максимальные значения напряженности магнитного поля и градиента достигают соответственно 180 кА/м и $8 \cdot 10^4$ кА/м². Проведено исследование формы и устойчивости сидячего и подвешенного магнитожидкостного покрытия при различных ориентациях пластины.

Результаты. Изучена форма и устойчивость магнитожидкостного покрытия на горизонтальной и вертикальной пластине. Установлены экспериментальные зависимости высоты и длины покрытия от объема магнитной жидкости. Установлено, что покрытие может иметь некоторый максимальный объем. При превышении этого объема происходит растекание жидкости по поверхности пластины либо отрыв части объема жидкости. Предельный объем покрытия определяется магнитными характеристиками магнитной жидкости и магнитного поля.

Вывод. Установлена возможность формирования сидячего и подвешенного локального магнитожидкостного покрытия на горизонтальной и вертикальной пластине. Высота и длина магнитожидкостного покрытия на пластине зависят от объема магнитной жидкости, а также от характеристик магнитной системы и намагниченности магнитной жидкости. Полученные результаты могут быть использованы при формировании магнитожидкостных покрытий охлаждаемых участков нагретых поверхностей.

Ключевые слова: магнитная жидкость; свободная поверхность; магнитное поле; магнитожидкостное покрытие.

Финансирование: Публикация подготовлена при выполнении Задания 2.15 государственной программы научных исследований «Энергетические и ядерные процессы и технологии» (2021–2025 гг.).

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Залетило А. А., Рекс А. Г. Форма и устойчивость локального теплопередающего магнитожидкостного покрытия на пластине // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13, № 2. С. 150–163. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-150-163>

Поступила в редакцию 18.03.2023

Подписана в печать 25.04.2023

Опубликована 30.05.2023

© Залетило А. А., Рекс А. Г., 2023

Shape and Stability of a Local Heat-Transfer Magnetofluid Coating on a Plate

Alexandra A. Zaliatsila¹, Alexander G. Reks¹

¹ Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosti Ave., Minsk 220013, Republic of Belarus

✉ e-mail: agreks@tut.by

Abstract

Purpose. Investigate the shape and stability of a magnetic fluid coating on a flat surface in a non-uniform magnetic field of a permanent magnet.

Methods. Magnetic fluids based on transformer oil MMT-44 and MMT-21 with saturation magnetization of 43.8 and 21.2 kA/m, respectively, were used in the experiments. A magnetic-fluid coating was formed on the surface of horizontal and vertical non-magnetic plates in a locally inhomogeneous magnetic field of permanent magnets. The source of the inhomogeneous magnetic field is a system of two rectangular magnets. The size of the magnetic system is 40×12×10 mm. The maximum values of the magnetic field strength and gradient reach 180 kA/m and $8 \cdot 10^4$ kA/m², respectively. The shape and stability of a sessile and suspended magnetic fluid coating were studied for various plate orientations.

Results. The shape and stability of the magnetic fluid coating on horizontal and vertical plates are studied. The experimental dependences of the height and length of the coating on the volume of the magnetic fluid are established. It is established that the coating can have a certain maximum volume. When this volume is exceeded, the liquid spreads over the surface of the plate or a part of the liquid volume is separated. The limiting volume of the coating is determined by the magnetic characteristics of the ferrofluid and the magnetic field.

Conclusion. The possibility of forming a sessile and suspended local magnetic fluid coating on horizontal and vertical plates is established. The height and length of the magnetic fluid coating on the plate depend on the volume of the magnetic fluid, as well as on the characteristics of the magnetic system and the magnetization of the magnetic fluid. The results obtained can be used in the formation of magnetic fluid coatings of cooled sections of heated surfaces.

Keywords: magnetic fluid; free surface; magnetic field; magnetic fluid coating.

Funding: The publication was prepared in the course of completing Task 2.15 of the State Scientific Research Program "Energy and Nuclear Processes and Technologies" (2021–2025).

Conflict of interest: The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Zaliatsila A. A., Reks A. G. Shape and Stability of a Local Heat-Transfer Magnetofluid Coating on a Plate. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2023; 13(2): 150–163. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-150-163>

Received 18.03.2023

Accepted 25.04.2023

Published 30.05.2023

Введение

Интенсивность теплоотдачи от нагретых поверхностей в жидкие среды значительно выше, чем в газообразные, благодаря лучшим условиям теплоотвода [1–2]. Поэтому интенсивное охлаждение производится обычно погружением охлаждаемых тел и поверхностей в жидкости. Однако при необходимости создания лучших

условий теплоотдачи отдельных локальных участков поверхности возникает проблема с невозможностью нанесения ограниченных объемов жидкости на эти участки из-за ее растекания по всей поверхности в виде тонкого слоя.

Высокая чувствительность магнитных жидкостей к магнитным полям создает уникальные возможности формирования необходимой геометрии их объемов

за счет выбранной конфигурации магнитного поля [3–7]. Использование магнитных жидкостей в качестве теплопередающей среды и соответствующих магнитных систем позволяет сформировать локальные покрытия необходимой конфигурации, поскольку неоднородным магнитным полем эти покрытия надежно удерживаются на охлаждаемых участках поверхности.

В неоднородном магнитном поле объемная магнитная сила, действующая на магнитную жидкость, может в сотни раз превышать гравитационную силу, и этот факт позволяет сформировать магнито-жидкостное покрытие на твердых поверхностях, имеющих любую ориентацию – горизонтальную, вертикальную, наклонную.

Магнито-жидкостное покрытие, помещенное на теплоотдающую поверхность, позволяет реализовать два механизма управления магнитным полем процессом теплопереноса.

Во-первых, в магнитном поле возможно развитие неустойчивости свободной поверхности магнитной жидкости, результатом которой является развитая теплоотдающая поверхность в виде периодической системы пиков, распределенных по поверхности жидкости [4; 8–9]. Теплоотдающая поверхность магнитной жидкости увеличивается, и в результате повышается интенсивность отдачи тепла в окружающую среду [10–14].

Во-вторых, магнитная жидкость, контактирующая с нагретой поверхностью, является неоднородно нагретой, и в неоднородном магнитном поле помимо гравитационного механизма конвективного движения в жидкости возникает еще и специфический термомагнитный механизм конвективного движения [4; 5; 15–17].

Созданное неоднородным магнитным полем магнито-жидкостное покрытие мо-

жет явиться основой создания магнитоуправляемых жидких контактов для передачи тепловой, акустической и электрической энергии [18–20].

Значительный интерес также имеет использование системы покрытий внутренних стенок каналов для снижения их гидравлического сопротивления с одновременным увеличением теплоотдачи от твердых поверхностей [21].

Нужно отметить, что возможно создание локального магнито-жидкостного покрытия даже в однородных магнитных полях в виде нерастаевающейся капли магнитной жидкости как на твердой поверхности, так и на жидкой подложке [4–5; 22–23]. Данные покрытия могут быть реализованы в некотором диапазоне магнитных полей и устойчивы в гравитационном и даже в ультразвуковых полях.

Цель исследования – исследование формы и устойчивости магнито-жидкостного покрытия на плоской поверхности в неоднородном магнитном поле постоянного магнита.

Материалы и методы

Геометрия рассматриваемой задачи показана на рисунке 1. Рассматривается локальное магнито-жидкостное покрытие на поверхности пластины горизонтальной (рис. 1, а, б) и вертикальной (рис. 1, в) ориентации. Покрытие представляет собой объем магнитной жидкости, удерживаемый на пластине постоянным магнитом. Удержание магнитной жидкости происходит за счет действия на нее объемной магнитной силы в локально неоднородном магнитном поле магнита с градиентом напряженности, направленным к пластине.

В зависимости от расположения магнита по отношению к пластине возможно формирование сидячего на пластине покрытия (рис. 1, а) либо подвешенного на ней покрытия (рис. 1 а, в).

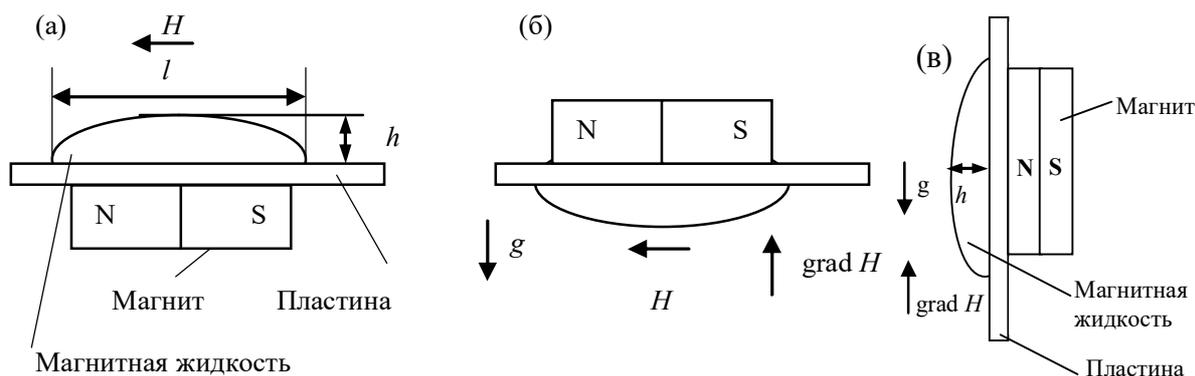


Рис. 1. Геометрия задачи

Fig. 1. Geometry of problem

Рассматриваемое покрытие характеризуется геометрическими размерами: высотой h и длиной основания l .

Направление напряженности магнитного поля в области магнитоожидкостного покрытия задается соответствующей ориентацией магнита. Если магнит касается пластины своей боковой поверхностью (см. рис. 1, а, б), то в области покрытия создается поле с преобладающей тангенциальной компонентой поля. В таком поле поверхность покрытия гладкая. При касании пластины полюсом магнита в области покрытия преобладает нормальная к пластине компонента поля. В таком случае возможно развитие неустойчивости на поверхности магнитной жидкости, в резуль-

тате чего она приобретает более развитую форму, представляющую систему распределенных вертикальных пиков.

В экспериментах использовались магнитные жидкости ММТ-44 и ММТ-21 с различной намагниченностью насыщения, синтезированные методом эмульгирования [24]. Жидкая основа – трансформаторное масло, магнитная фаза – частицы магнетита, стабилизированные поверхностно-активным веществом – олеиновой кислотой.

Основные свойства используемых образцов магнитных жидкостей представлены в таблице 1, кривые намагничивания – на рисунке 2.

Таблица 1. Физические свойства исследуемых магнитных жидкостей

Table 1. Physical properties of the studied magnetic fluids

Свойства жидкостей Properties of fluids	ММТ-44	ММТ-21
Жидкая основа Liquid base	Трансформаторное масло Transformer oil	
Намагниченность насыщения M_s , кА/м Saturation magnetization M_s , kA/m	43,8	21,2
Магнитная концентрация частиц φ_m , % Magnetic concentration of particles φ_m , %	9,13	4,4
Плотность ρ , кг/м ³ Density ρ , kg/m ³	1400	1180
Поверхностное натяжение σ , мН/м Surface tension σ , mN/m	28,3	28,8

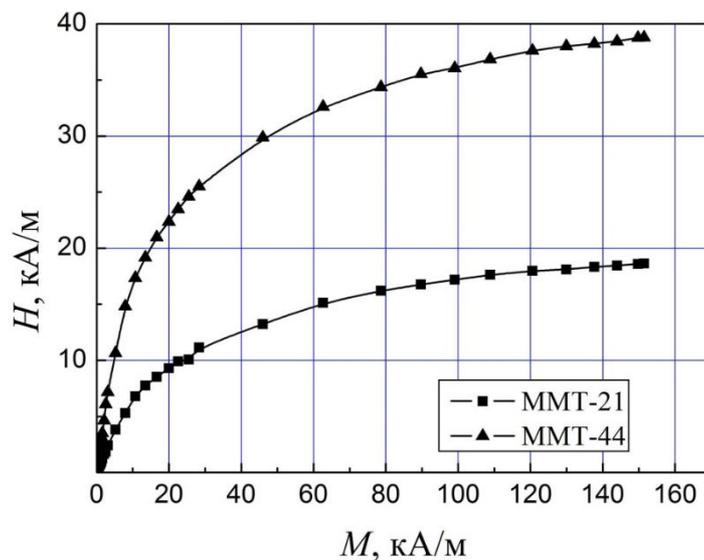


Рис. 2. Кривые намагничивания образцов магнитной жидкости

Fig. 2. Magnetization curves of magnetic fluid samples

Выбор магнитной жидкости ММТ-21 с малой концентрацией магнитной фазы обусловлен тем, что ее намагниченность в диапазоне напряженностей используемых магнитных полей не достигает критического значения [4], при котором развивается неустойчивость свободной поверхности. Тем самым обеспечивается получение гладкой поверхности покрытия при любых направлениях напряженности магнитного поля.

Схема экспериментальной установки показана на рисунке 3. Основой установки являются две тонкие плексиглазовые горизонтальные пластины 1 и 2, закрепленные на вертикальных неподвижных опорах. Эти пластины имеют возможность перемещаться в вертикальном направлении с помощью микрометрических винтов 3 и 4.

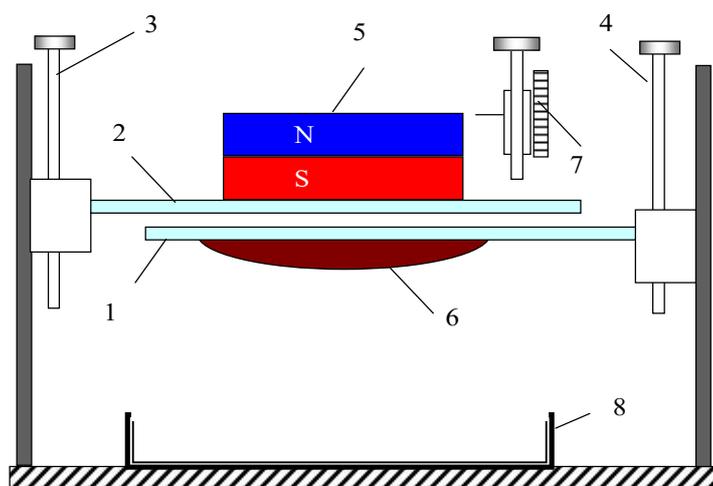


Рис. 3. Экспериментальная установка

Fig. 3. Experimental setup

При изучении формы подвешенного покрытия, как показано на приведенном рисунке, постоянный магнит 5 устанавливается на верхней пластине 2, а магнитожидкостное покрытие 6 формируется на нижней поверхности нижней пластины 1. За счет вертикального перемещения одной из пластин в области формирования покрытия создается магнитное поле с необходимыми параметрами.

Для формирования лежащего покрытия магнит устанавливается на нижней пластине 1, а магнитная жидкость известного объема наносится на верхнюю поверхность верхней пластины 2. Вертикальное положение пластин регистрируется горизонтальным щупом 7 на координатнике с микрометрическим винтом. Под пластинами размещается сосуд 8 для улавливания и сбора магнитной жидкости.

Регистрация формы покрытия осуществляется цифровой фотокамерой с последующей обработкой на компьютере.

Вертикальным перемещением магнита изменяется его положение относительно объема магнитной жидкости и тем

самым задается конфигурация магнитного поля, определяющая форму создаваемого покрытия и устойчивость.

Для создания локально неоднородного магнитного поля наиболее подходящей оказалась система из двух последовательно соединенных кобальт-самариевых магнитов прямоугольной формы. Размер магнитной системы 40x12x10 мм. Такая система выбрана с целью обеспечения магнитного поля высокой напряженности в значительной области пространства вокруг магнита.

Распределение напряженности и градиента напряженности магнитного поля в направлении, перпендикулярном поверхности магнитной системы, показано на рисунке 4. На поверхности магнита максимальные значения напряженности магнитного поля и градиента достигают соответственно 180 кА/м и $8 \cdot 10^4$ кА/м². При удалении от поверхности магнита напряженность поля значительно снижается, соответствующим образом снижается и градиент поля.

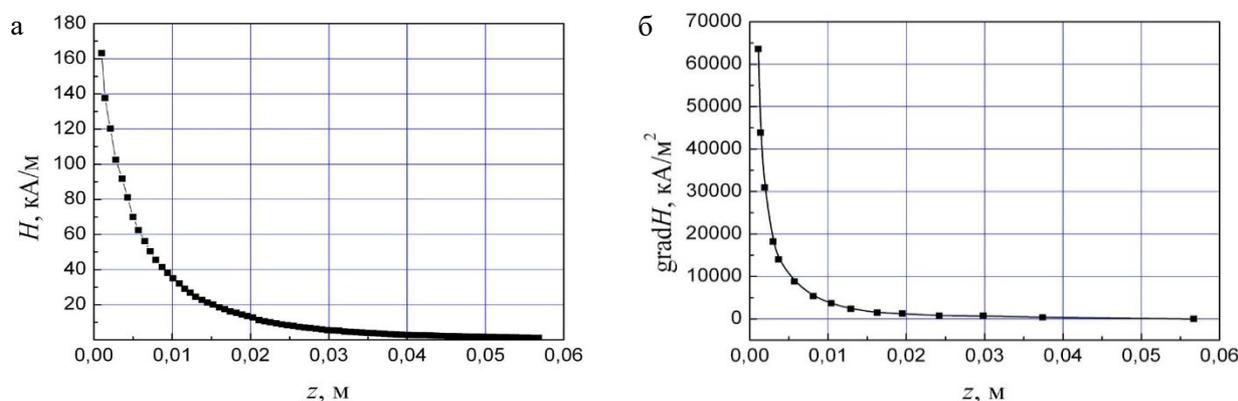


Рис. 4. Распределение напряженности (а) и градиента напряженности (б) магнитного поля магнитной системы

Fig. 4. The distribution of the strength (a) and gradient of the magnetic field (б) of the magnetic system

Выполненная оценка величины объемной магнитной силы для использованных магнитных жидкостей ММТ-44 и ММТ-21 и магнитной системы показала, что отношение $\mu_0 MVH/\rho g$ может достигать значения 260.

Для изучения формы покрытия использованы две методики исследования. В соответствии с первой методикой при постоянном положении магнита относительно пластины (постоянной величине градиента магнитного поля) добавлялись

фиксированные порции магнитной жидкости и определялись геометрические характеристики покрытия в широком диапазоне объемов жидкости. Предельным принимался объем, проявляющий склонность к растеканию жидкости на поверхности пластины.

Вторая методика основана на формировании начального исходного покрытия при максимальном градиенте поля. Затем велось наблюдение за изменением формы покрытия при квазистатическом уменьшении градиента поля при перемещении магнита относительно пластины.

Таблица 2. Форма магнитожидкостного покрытия различного объема

Table 2. The shape of the magnetic fluid coating of various volumes

Тангенциальное поле Tangential field		Нормальное поле Normal field
Сидячее покрытие Sitting cover	Подвешенное покрытие Suspended coating	Сидячее покрытие Sitting cover
		

Приведенные в таблице 2 фотографии свидетельствуют, что в поле с тангенциальным направлением напряженности на поверхности пластины образуются сидячее и подвешенное покрытия с гладкой поверхностью.

В магнитном поле с нормальной компонентой поверхность покрытия не является гладкой, а представляет собой систему распределенных по поверхности пиков. Появление пиков обусловлено развитием поверхностной неустойчивости при достижении намагниченностью жидкости критических значений [4]. Нужно отметить, на покрытия магнитной жидкостью ММТ-21 пики не образуются, поскольку в диапазоне магнитных полей, создаваемых магнитом, намагниченность данной жидкости не достигает критического значения.

При фиксированных параметрах магнитного поля с увеличением объема жидкости растут высота и длина покрытия.

Результаты и их обсуждение

Покрытие на горизонтальной пластине

Характерные формы покрытия магнитной жидкостью ММТ-44 объемом 13500 мм³ на горизонтальной пластине в магнитном поле с градиентом $\text{grad } H = 25400 \text{ кА/м}^2$ для различных направлений магнитного поля иллюстрируются таблицей 2.

Покрытия обладают симметрией относительно магнита и имеют протяженность вдоль длинной стороны магнита.

Зависимости высоты h и длины основания l от объема сидячего покрытия в магнитном поле с тангенциальной компонентой с градиентом напряженности 78500 кА/м² приведены на рисунке 5.

Высота сидячего покрытия с увеличением объема жидкости пропорционально растет, и для магнитной жидкости ММТ-44 достигает 13 мм (рис. 5, а). Магнитная жидкость с более слабыми магнитными свойствами ММТ-21 образует покрытие несколько меньшей высоты, но с более протяженным основанием по сравнению с жидкостью ММТ-44 (рис. 5, а, б). Такое различие форм обусловлено разной намагниченностью жидкостей, из-за которой отличаются магнитные силы, противодействующие гравитационным силам.

Длина основания покрытия для больших объемов жидкости превышает длину магнита до полутора раз.

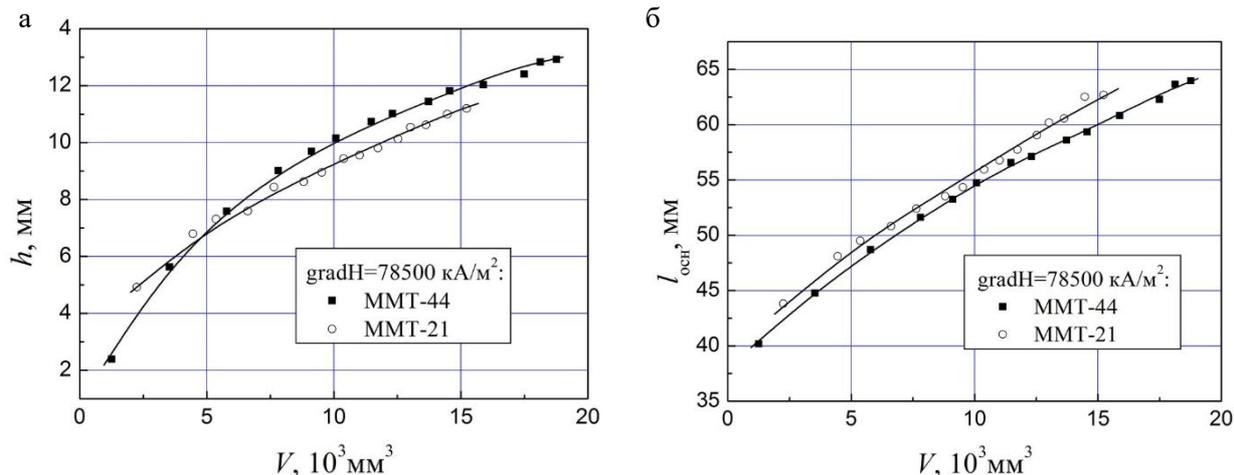


Рис. 5. Зависимость геометрических параметров от объема сидячего покрытия в тангенциальном магнитном поле

Fig. 5. Dependence of geometrical parameters on the volume of the sessile coating in a tangential magnetic field

Объем жидкости при формировании сидячего покрытия имеет некоторый предел, обусловленный растеканием жидкости вблизи его основания, поскольку часть объема жидкости оказывается в области более слабых полей.

Особенность формирования подвешенного покрытия в том, что действующая вниз гравитационная сила более значительно увеличивает высоту покрытия по сравнению с лежащим покрытием (рис. 6).

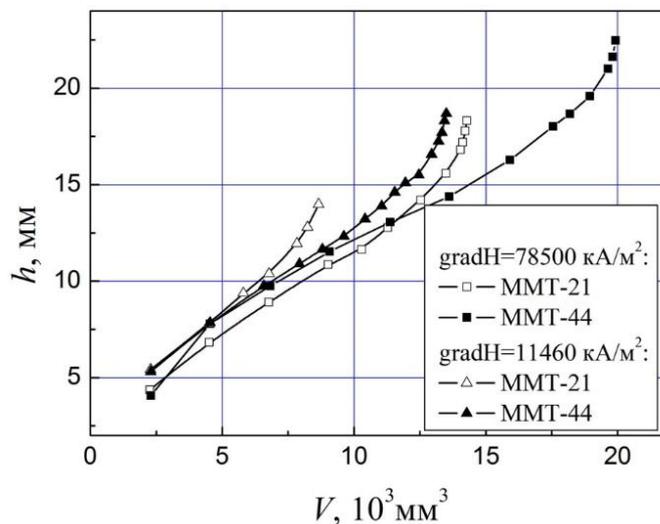


Рис. 6. Зависимость высоты от объема подвешенного покрытия

Fig. 6. Dependence of height on the volume of the suspended coating

Магнитные жидкости с более сильными магнитными характеристиками (ММТ-44) позволяют подвесить на пластину устойчивое покрытие большего

объема, имеющее высоту большей величины. Увеличению геометрических параметров покрытия значительно способствует увеличение градиента напряженности магнитного поля из-за роста объемной

магнитной силы, удерживающей покрытие на нижней поверхности пластины.

Высота растет пропорционально объему жидкости, затем при некотором объеме на зависимости появляется перегиб, скорость изменения высоты возрастает и достигает некоторого предела. При дальнейшем увеличении объема происходит отрыв части покрытия.

При дальнейшем увеличении объема развивается неустойчивость, в результате которой нарушается целостность покрытия и происходит отрыв части его вершины. Область вершины находится в области более слабых магнитных полей.

Градиент поля недостаточен для создания удерживающей жидкость магнитной силы, и под действием силы тяжести происходит отрыв.

Предельный удерживаемый объем жидкости зависит как от характеристик поля, так и от магнитных свойств магнитных жидкостей. Учет этих факторов позволил получить обобщенную зависимость предельного объема подвешенного покрытия от соотношения магнитной и гравитационной сил (рис. 7). Как свидетельствует рисунок, условия устойчивости хорошо совпадают для жидкостей с различной намагниченностью насыщения.

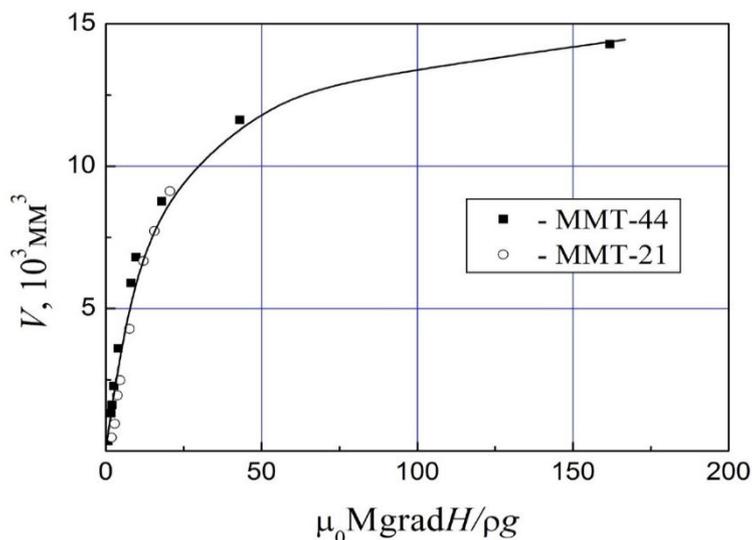


Рис. 7. Зависимость предельного объема подвешенного покрытия от соотношения магнитной и гравитационной сил

Fig. 7. Dependence of the limiting volume of a suspended coating on the ratio of magnetic and gravitational forces the liquid surface above the cylinder on the field strength H for MMT-10 and MMT-44 liquids

Покрытие на вертикальной пластине

Как показано на рисунке 1, б, покрытие магнитной жидкости формируется и удерживается на вертикальной поверхности пластины с помощью постоянного магнита, расположенного на другой поверхности пластины.

Для формирования магнитожидкостного покрытия на вертикальной пластине требуется создание, прежде всего, силы, противодействующей силе тяжести, а также силы, прижимающей покрытие к

пластине. В соответствии с этим существенное значение имеют градиенты напряженности магнитного поля, перпендикулярные поверхности магнита, а также и вдоль него. Анализ продольного распределения напряженности магнитного поля вдоль длинной оси магнита показал, что градиент имеет максимальное значение $40 \cdot 10^3 \text{ кА/м}^2$ в области торцевых кромок магнита.

Характерные формы магнитожидкостного покрытия на вертикальной пластине иллюстрируются фотографиями на

рисунке 8. На представленных фотографиях показаны покрытия различных объемов магнитной жидкости ММТ-44 в магнитном поле с одинаковым постоянным

градиентом напряженности на поверхности пластины $10,1 \cdot 10^3 \text{ кА/м}^2$; направление поля – тангенциальное.

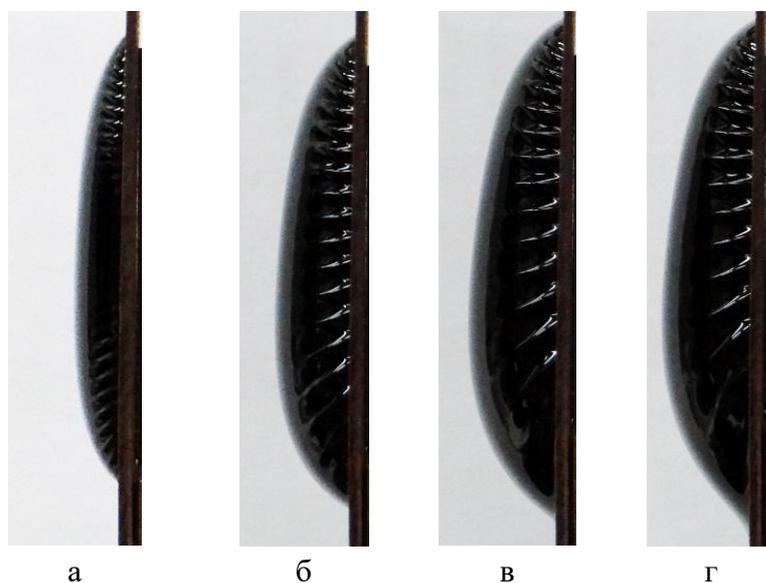


Рис. 8. Покрытия различных объемов на вертикальной пластине: а – $V = 2,6 \cdot 10^3 \text{ мм}^3$; б – $V = 6,3 \cdot 10^3 \text{ мм}^3$; в – $V = 9,4 \cdot 10^3 \text{ мм}^3$; г – $V = 10,3 \cdot 10^3 \text{ мм}^3$

Fig. 8. Coatings of various volumes on a vertical plate: а – $V = 2,6 \cdot 10^3 \text{ мм}^3$; б – $V = 6,3 \cdot 10^3 \text{ мм}^3$; в – $V = 9,4 \cdot 10^3 \text{ мм}^3$; г – $V = 10,3 \cdot 10^3 \text{ мм}^3$

При небольших объемах жидкости площадь основания покрытия меньше площади магнита. При увеличении объема жидкости габариты покрытия увеличиваются и, начиная с некоторого объема, длина и ширина покрытия начинают превышать размеры магнита. Поверхность покрытия гладкая.

Если на горизонтальной пластине покрытие характеризуется симметрией формы в продольном и поперечном направлениях, то на вертикальной пластине из-за силы тяжести, направленной вдоль пластины, симметрия вдоль длинной оси нарушается. Покрытие смещено вниз относительно магнитной системы, максимальная его толщина также смещена вниз относительно центра магнита. Для магнитной жидкости с намагниченностью насыщения $43,8 \text{ кА/м}$ высота покрытия достигает значения порядка 10 мм .

Устойчивое подвешенное покрытие на вертикальной пластине может суще-

ствовать лишь в некотором диапазоне неоднородности магнитных полей. Существует поле с минимальной неоднородностью, когда градиент поля не может обеспечить магнитную силу, противодействующую силе тяжести.

Для каждого положения магнита существует некоторый максимальный объем жидкости, при превышении которого нарушается его целостность, и происходит стекание с пластины некоторой части объема жидкости. Перед достижением максимального объема форма покрытия претерпевает изменения, состоящие в удлинении нижней части покрытия и резком уменьшении нижнего угла контакта и пластиной. На рисунке 8, г фотография соответствует предкритическому объему покрытия.

Зависимости предельного объема покрытия, удерживаемого на пластине, от градиента магнитного поля приведены на рисунке 9. Видно, что предельный объем

зависит как от характеристик поля, так и от намагниченности жидкости. Это объясняется тем, что объемная магнитная сила

$\mu_0 M \nabla H$ определяется намагниченностью M магнитной жидкости и градиентом поля.

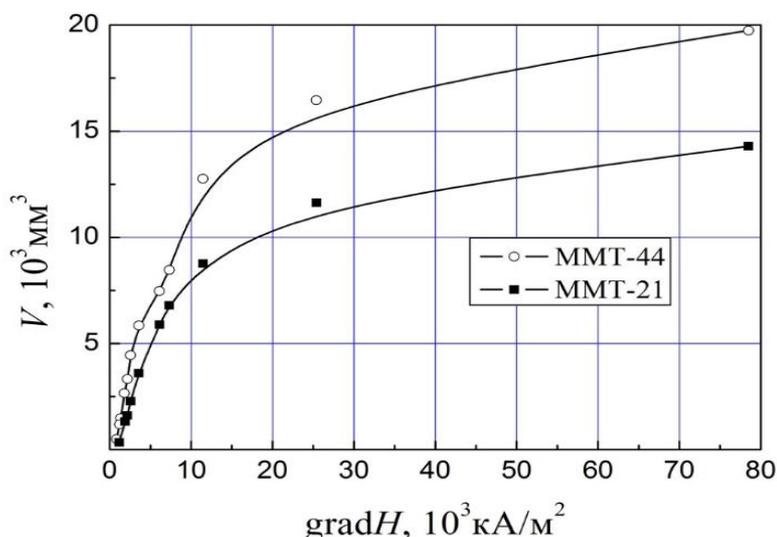


Рис. 9. Влияние градиента магнитного поля на максимальный удерживаемый объем покрытия

Fig. 9. Influence of the magnetic field gradient on the maximum retention volume of the coating

Покрытие большего объема на вертикальной пластине можно получить при использовании магнитных жидкостей с более сильными магнитными свойствами, т. е. с большей намагниченностью.

Заключение

Установлена возможность формирования сидячего и подвешенного локального магнитожидкостного покрытия на горизонтальной и вертикальной пластинах.

Получены зависимости высоты и длины магнитожидкостного покрытия на

пластине от объема магнитной жидкости, которые определяются магнитными характеристиками магнитной системы и намагниченностью магнитной жидкости.

Установлены зависимости предельного объема магнитной жидкости, подвешенного на горизонтальной и вертикальной пластинах, от вертикального градиента магнитного поля, а также от соотношения магнитной и гравитационной сил.

Полученные результаты могут быть использованы при формировании магнитожидкостных покрытий охлаждаемых участков нагретых поверхностей.

Список литературы

1. Кутателадзе С. С., Накоряков В. Е.. Теплообмен и волны в газожидкостных системах. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1984. 302 с.
2. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. 5-е изд., стер. М.: АРИС, 2014. 417 с.
3. Rosensweig R. E. Ferrohydrodynamics. Cambridge, USA: Cambridge University Press, 1985. 344 p.
4. Баштовой В. Г., Берковский Б. М., Вислович А. Н. Введение в термомеханику магнитных жидкостей. М.: ИВТАН СССР, 1985. 188 с.
5. Берковский Б. М., Медведев В. Ф., Краков М. С. Магнитные жидкости. М.: Химия, 1989. 240 с.

6. Magnetic fluids and applications handbook / editor-in-chief: V. Berkovski, ed. V. Bashtovoi. New York, USA: Begell House Inc. Publishers, 1996. 851p.
7. Рекс А. Г. Некоторые вопросы механики магнитожидкостных систем со свободной поверхностью. Минск: Белорус. нац. техн. ун-т, 2005. 256 с.
8. Nonlinear waves on the magnetic fluid surface / V. Bashtovoi, A. Reks, E. Taits, R. Foiguel // J. Magnetism and Magnetic Materials. 1987. Vol. 65. P. 321–323.
9. Баштовой В. Г., Краков М. С., Рекс А. Г. Неустойчивость плоского слоя магнитной жидкости в закритической области магнитного поля // Магнитная гидродинамика. 1985. № 1. С. 19–24.
10. А.С. 1472746 СССР, МПК F28F 13/02. Способ регулирования теплообмена / В. Г. Баштовой, Ю. А. Волков, Н. Е. Волкова, А. Г. Рекс, Е. М. Тайц, В. А. Чернобай (СССР). № 4153563/24-06; заявл. 01.12.86; опубл. 15.04.89, Бюл. № 14.
11. Баштовой В. Г., Краков М. С., Тайц Е. М. Управление теплообменом в системах с границей раздела магнитной и немагнитной жидкостей // Магнитная гидродинамика. 1989. № 4. С. 60–66.
12. Баштовой В. Г., Волкова О. Ю., Рекс А. Г. Влияние ориентации магнитного поля на процесс теплопереноса при кипении магнитных жидкостей // Магнитная гидродинамика. 1992. № 2. С. 27–31.
13. Controlled heat transfer in two-component magnetofluid systems / V. Bashtovoi, S. Pogiritskaya, A. Reks, O. Volkova // J. Magnetism and Magnetic Materials. 1993. Vol. 122. P. 309–311.
14. Bashtovoi V., Chernobai V. Nguyen Quyet Thang. Experimental study of heat transfer control in rectangular channel with magnetofluid coating // J. Magnetism and Magnetic Materials. 1993. Vol. 122. P. 294–296.
15. Агеев В. А., Бельбердин В. В., Веприк И. Ю. Конвекция магнитных жидкостей в неоднородных магнитных полях // Магнитная гидродинамика. 1990. № 2. С. 61–65.
16. Krakov M. S., Nikiforov I. V., Kamiyama S. Three-dimensional thermomagnetic convection in a cubic cavity in the presence of an external uniform magnetic field // Magnetohydrodynamics. 2004. Vol. 40, no. 3, P. 285–296.
17. Koskov M. Technical framework for studying thermomagnetic convection in an extended closed loop // Magnetohydrodynamics 2022. Vol. 58, no. 3. P. 267–274.
18. Patent 5,135,048 US. Active temperature differential control / Behrle R., Lenski H. Appl. 12, Aug. 4, 1992; Aug. 4, 1992.
19. А.С. 697916 СССР, МКЛ G01N 29/04. Способ создания акустического контакта при ультразвуковых измерениях / А. Р. Баев, В. Г. Баштовой, Г. Е. Коновалов, П. П. Прохоренко, Н. В. Дежкунов (СССР). № 2603751/25-28; заявл. 13.04.78; опубл. 15.11.79, Бюл. № 42.
20. А.С. 904009 СССР, МПК H01P 1/66. Коммутационное устройство / Н. А. Дубровин, Н. И. Дюповкин, Ю. А. Митькин, Д. В. Орлов (СССР). № 29377599; заявл. 06.10.80; опубл. 02.07.82, Бюл. № 5.
21. Корделюк А. С., Краков М. С. Влияние формы магнитожидкостного покрытия на гидравлическое сопротивление круглых труб // Магнитная гидродинамика. 1989. № 4. С. 112–117.
22. Topological instability of semi-bounded magnetic fluid drop under influence of magnetic and ultrasound fields / V. Bashtovoi, A. Reks, A. Baev, Al-Jhaish Taha Malik Mansoor // J. Magnetism and Magnetic Materials. 2017. Vol. 431. P. 42–45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.09.055>.

23. Бушуева К. А., Костарев К. Г., Шмырова А. И. Деформация капли феррожидкости, лежащей на жидкой подложке, в однородном вертикальном магнитном поле // Конвективные течения. 2015. № 7. С. 143–157.

24. Патент 18260 Республики Беларусь, МПК H01F1/44, C016G 49/08. Способ получения магнитной жидкости / Сулоева Л. В., Баштовой В. Г., Рекс А. Г., Моцар А. А., Кузир П. П. № 20120314; заявл. 02.03.2021; опубл. 30.14.2013.

References

1. Kutateladze S. S., Nakoryakov V. E. *Teplomassoobmen i volny v gazozhidkostnykh sistemakh* [Heat and mass transfer and waves in gas-liquid systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., Sib. otd-nie, 1984. 302 p.

2. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. *Teplotperedacha* [Heat transfer]. 5th ed., ster. Moscow, ARIS Publ., 2014. 417 p.

3. Rosensweig R. E. *Ferrohydrodynamics*. Cambridge, USA, Cambridge University Press, 1985. 344 p.

4. Bashtovoy V. G., Berkovskiy B. M., Vislovich A. N. *Vvedenie v termomekhaniku magnitnykh zhidkosti* [Introduction to Thermomechanics of Magnetic Fluids]. New York, USA, Hemisphere Publishing Corporation, 1988. 216 p.

5. Berkovskiy B. M., Medvedev V. F., Krakov M. S. *Magnitnye zhidkosti* [Magnetic Fluids]. Moscow, Khimiya Publ., 1993. 243 p.

6. *Magnetic fluids and Applications Handbook*; editor-in-chief: B. Berkovski; ed. V. Bashtovoi. New York, USA, Begell House Inc. Publ., 1996. 851 p.

7. Reks A. G. *Nekotoryye voprosy mekhaniki magnitozhidkostnykh sistem so svobodnoy poverkhnost'yu* [Some questions of mechanics of magnetofluidic systems with a free surface]. Minsk, Belarusian National Technical Univ. Publ., 2005. 256 p.

8. Bashtovoi V., Reks A., Taits E., Foiguel R. Nonlinear waves on the magnetic fluid surface. *J. Magnetism and Magnetic Materials*, 1987, vol. 65, pp. 321–323.

9. Bashtovoi V. G., Krakov M. S., Reks A. G. Neustoichivost' ploskogo sloya magnitnoi zhidkosti v zakriticheskoi oblasti magnitnogo polya [Instability of a flat layer of magnetic liquid for supercritical magnetic fields]. *Magnitnaya gidrodinamika = Magnetohydrodynamics*, 1985, vol. 21, no. 1, pp. 14–18.

10. Bashtovoi V. G., Volkov Yu. A., Volkova N. E., Reks A. G., Taits E. M., Chernobay V. A. *Sposob regulirovaniya teploobmena* [Method for regulating heat transfer]. A.S. USSR, no. 1472746, 1989.

11. Bashtovoi V. G., Krakov M. S., Taits E. M. *Upravlenie teploobmenom v sistemakh s granitsej razdela magnitnoi i nemagnitnoi zhidkosti* [Controlling the exchange of heat in systems with a boundary of separation between magnetic and nonmagnetic fluids]. *Magnitnaya gidrodinamika = Magnetohydrodynamics*, 1989, vol. 25, no. 4, pp. 465–470.

12. Bashtovoi V. G., Volkova O. Yu., Reks A. G. *Vliyanie orientatsii magnitnogo polya na protsess teploperenosa pri kipenii magnitnykh zhidkosti* [The effect of magnetic-field orientation on the heat-transfer process when magnetic fluids are brought to a boil]. *Magnitnaya gidrodinamika = Magnetohydrodynamics*, 1992, vol. 28, no. 2, pp. 126–129.

13. Bashtovoi V., Pogiritskaya S., Reks A., Volkova O. Controlled heat transfer in two-component magnetofluid systems. *J. Magnetism and Magnetic Materials*, 1993, vol. 122, pp. 309–311.

14. Bashtovoi V., Chernobai V., Nguyen Quyet Thang. Experimental study of heat transfer control in rectangular channel with magnetofluid coating. *J. Magnetism and Magnetic Materials*, 1993, vol. 122, pp. 294–296.

15. Ageev V. A., Balyberdin V. V., Veprik I. Yu. Konvektsiya magnitnykh zhidkosti v ne-odnorodnykh magnitnykh polyakh [Magnetic-fluid convection in a nonuniform magnetic field]. *Magnitnaya gidrodinamika = Magnetohydrodynamics*, 1990, vol. 26, no. 2, pp. 184–188.

16. Krakov M. S., Nikiforov I. V., Kamiyama S. Three-dimensional thermomagnetic convection in a cubic cavity in the presence of an external uniform magnetic field. *Magnetohydrodynamics*, 2004. vol. 40. no. 3, pp. 285–296.

17. Koskov M. Technical framework for studying thermomagnetic convection in an extended closed loop. *Magnetohydrodynamics*, 2022, vol. 58, no. 3, pp. 267–274.

18. Behrle R., Lenski H. Active temperature differential control. Patent US, no. 5135048, 1992.

19. Baev A. R., Bashtovoi V. G., Konovalov G. E., Prokhorenko P. P., Dezhkunov N. V. Sposob sozdaniya akusticheskogo kontakta pri ul'trazvukovykh izmereniyakh [Method for creating acoustic contact during ultrasonic measurements]. A.S. USSR, no. 697916, 1979.

20. Dubrovin N. E., Dyupovkin N. I., Mitkin Yu. A., Orlov D. V. Kommutatsionnoe ustroystvo [Switching device]. A.S. USSR, no. 904009, 1982.

21. Kordelyuk A. S., Krakov M. S. Vliyanie formy magnitnozhidkostnogo pokrytiya na gidravlichesкое soprotivlenie kruglykh trub [The effect of the shape of a magnetofluid coating on the hydraulic resistance of circular tubes]. *Magnitnaya gidrodinamika = Magnetohydrodynamics*, 1989, vol. 25, no. 4, pp. 512–516.

22. Bashtovoi V., Reks A., Baev A., Al-Jhaish Taha Malik Mansoor. Topological instability of semi-bounded magnetic fluid drop under influence of magnetic and ultrasound fields. *J. Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, vol. 431, pp. 42–45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.09.055>

23. Bushuyeva K. A., Kostarev K. G., Shmyrova A. I. Deformatsiya kapli ferrozhidkosti, lezhashchei na zhidkoi podlozhke, v odnorodnom vertikal'nom magnitnom pole [Deformation of a ferrofluid droplet lying on a liquid substrate in a uniform vertical magnetic field]. *Konvektivnyye techeniya = Magnitnaya gidrodinamika*, 2015, no. 7, pp. 143–157.

24. Suloyeva L. V., Bashtovoi V. G., Reks A. G., Motsar A. A., Kuzhir P. P. Sposob polucheniya magnitnoy zhidkosti [Method of obtaining magnetic fluid]. Patent BY, no. 18260, 2014.

Информация об авторах / Information about the Authors

Залетило Александра Анатольевна, магистрант кафедры ЮНЕСКО «Энергосбережение и возобновляемые источники энергии», Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, e-mail: zagadskaya01@mail.ru

Alexandra A. Zaliatsila, Undergraduate of the UNESCO Chair "Energy Saving and Renewable Energy Sources", Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, e-mail: zagadskaya01@mail.ru

Рекс Александр Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры ЮНЕСКО «Энергосбережение и возобновляемые источники энергии», Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, e-mail: agreks@tut.by

Alexander G. Reks, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Professor of the UNESCO Chair "Energy Saving and Renewable Energy Sources", Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, e-mail: agreks@tut.by