

Аппроксимация экспериментальных данных по динамике антиферромагнитных вихрей в доменной границе ортоферрита иттрия

Т. Б. Шапаева,^{*} Э. Ф. Худайгулова[†]

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра магнетизма. Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 09.08.2022; подписана в печать 12.11.2022)

С помощью метода наименьших квадратов были подобраны аппроксимирующие функции для экспериментальной зависимости полной скорости антиферромагнитного вихря от скорости движения доменной границы. Используя полученные функции и соотношение между скоростями вихря и доменной границы, были вычислены зависимости скорости вихря вдоль доменной границы u от скорости самой границы v . Было установлено, что, если скорость движения доменной границы меньше некоторой критической величины, зависимость $u(v)$ не определена. Это подтверждает ранее сделанный вывод о невозможности существования антиферромагнитных вихрей внутри доменной границы, если она движется со скоростью меньше скорости звука.

PACS: 75.40.Gb, 75.60.Ch, 75.70.Kw, 02.60.-x

УДК: 537.622.

Ключевые слова: антиферромагнитные вихри, динамика доменных границ и магнитных вихрей, аппроксимация экспериментальных данных.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование динамики магнитных вихрей представляет существенный интерес для нелинейной магнитодинамики, спинтроники и развития теории перемещения в слабых ферромагнетиках и антиферромагнетиках. Существование магнитных вихрей в тонких ферромагнитных пленках следует из уравнения Ландау–Лифшица [1, 2]. Экспериментальному и теоретическому исследованию свойств магнитных вихрей (вертикальных блоховских линий) в доменных границах пленок ферритов-гранатов посвящена работа [2]. Было показано, что подвижность магнитных вихрей превышает подвижность доменных границ. Исследование динамических свойств магнитных вихрей в малых частицах пермаллоя описано в работах [3, 4]. Авторы работы [4] исследовали переключение ядра магнитного вихря под действием импульсного магнитного поля. Показано, что переключение ядра магнитного вихря может происходить, если его скорость превышает некоторое критическое значение (около 200–300 м/с). Известно, что в ортоферритах наблюдается максимальная в настоящее время скорость движения доменных границ (ДГ) 20 км/с, равная скорости спиновых волн [2]. Поскольку подвижность магнитных вихрей выше, чем доменных границ, исследование динамики этих объектов весьма привлекательно с точки зрения их практического применения.

Как правило, в условиях реального эксперимента измерение любой зависимости $y(x)$ можно проводить только в строго определенном интервале изменения величины x . Однако нередко, для объяснения полученных результатов или планирования последующих экс-

периментов, желательно иметь представление о том, какой вид имеет экспериментальная зависимость вне доступного диапазона измерений. Для решения этой задачи можно использовать аппроксимирующую функцию, которая описывала бы экспериментальные результаты в доступной области измерений и была бы определена в более широком диапазоне.

Цель настоящей работы подобрать аппроксимирующие функции для экспериментальных зависимостей, а также сопоставить полученные результаты с данными дополнительных экспериментов.

1. ДИНАМИКА АНТИФЕРРОМАГНИТНЫХ ВИХРЕЙ ВНУТРИ ДОМЕННОЙ ГРАНИЦЫ ОРТОФЕРРИТА ИТТРИЯ

Динамику антиферромагнитных (АФМ) вихрей внутри доменной границы ортоферрита иттрия исследовали с помощью методов двух и трехкратной высокоскоростной фотографии на основе эффекта Фарадея [5, 6]. Ортоферриты — слабые ферромагнетики. При комнатной температуре во всех ортоферритах кроме самариевого реализуется упорядочение $G_x F_z$, при котором нормированные векторы намагниченности l и слабого ферромагнетизма m ориентированы вдоль осей a и c соответственно [2, 7]. Ортоферрит иттрия — двупреломляющий кристалл, оптическая ось которого составляет с осью c угол порядка 50° . Для наблюдения доменной структуры с помощью эффекта Фарадея пластинки ортоферрита вырезают перпендикулярно оптической оси [2].

При комнатной температуре в ортоферрите иттрия реализуется доменная граница ac типа, в которой вращение векторов l и m может происходить как по, так и против часовой стрелки, при этом вектора l и m остаются перпендикулярными друг другу и сохраняют свои

* shapaeva@mail.ru

† hudaygulovaelya@gmail.com

абсолютные величины. Область, разделяющая участки ДГ *ac* типа с противоположными направлениями вращения — это доменная граница *ab* типа, в которой вектор *l* вращается в плоскости (*ab*), а вектор *m*, не меняя ориентации вдоль оси *c*, уменьшает до нуля свою абсолютную величину, затем меняет направление на противоположное и увеличивает модуль до первоначального значения [6]. Поскольку подвижности доменных границ *ac* и *ab* типа различны, положение антиферромагнитного вихря внутри динамической доменной границы определяют по положению уединенной волны, отстающей как целое от самой границы.

В ортоферритах наблюдается максимальная скорость движения ДГ 20 км/с [8, 9]. Эта величина совпадает со скоростью спиновых волн на линейном участке их закона дисперсии. Скорость движения ДГ в ортоферрите сначала линейно возрастает при увеличении внешнего магнитного поля, достигает скорости звука (4 км/с), остается постоянной в некотором интервале магнитных полей, затем резко возрастает с 4 до 12 км/с, последующее увеличение внешнего магнитного поля приводит к насыщению скорости на уровне 20 км/с [8, 9]. Тот факт, что скорость движения ДГ остается неизменной при достижении 4 км/с при увеличении внешнего магнитного поля в некотором диапазоне, свидетельствует об изменении внутренней структуры границы. Для генерации пар АФМ вихрей участок доменной границы, движущейся со скоростью 12 км/с, тормозили с помощью локального дефекта или внешнего магнитного поля [10]. При скорости ДГ $v = 12$ км/с, скорость АФМ вихря вдоль нее $u = 16$ км/с, полная скорость вихря $w = 20$ км/с. На рис. 1 представлена двукратная фотография динамической доменной границы, с уединенными изгибными волнами, сопровождающими магнитные вихри. Направление движения доменной границы показано на рис.1, уединенные волны, которые сопровождаются АФМ вихрями, движутся вдоль доменной границы в противоположных направлениях с равными по модулю скоростями. Время задержки между двумя световыми импульсами 8 нс, длительность светового импульса 1/4 нс [6]. По фотографиям, аналогичным представленной на рис. 1, можно определить скорость движения ДГ, скорость уединенной волны, сопровождающей АФМ вихрь, вдоль ДГ, полную скорость этой волны, амплитуду волны и угол наклона переднего фронта этой волны. Изменение скорости движения ДГ приводит к изменению скорости вихря, при этом выполняется соотношение:

$$v^2 + u^2 = w^2. \tag{1}$$

На рис. 2 представлена зависимость полной скорости движения вихря от скорости движения ДГ. Полная скорость вихря возрастает при увеличении скорости движения границы, при этом максимальная величина w не превышает 20 км/с — максимальной скорости движения границы [8, 9].

На рис. 3 представлена зависимость скорости движе-

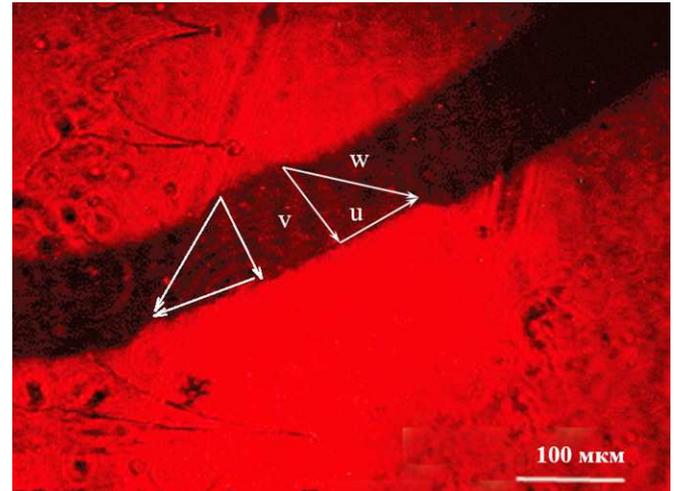


Рис. 1. Двукратная фотография динамической доменной границы, с уединенными волнами, сопровождающими динамические магнитные вихри. Время задержки между двумя световыми импульсами 8 нс, длительность светового импульса 1/4 нс. Скорость движения границы — v , скорость движения волны вдоль границы — u , полная скорость движения волны — w . На фото $v = u = 14$ км/с, $w = 20$ км/с [6]

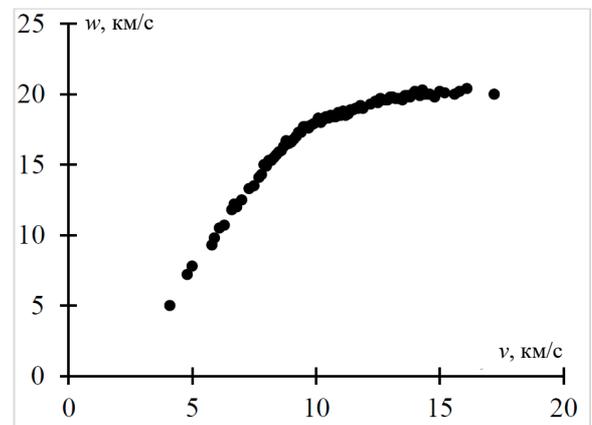


Рис. 2. Зависимость полной скорости вихря w от скорости движения доменной границы v . При фиксированной скорости движения доменной границы значения w были усреднены для разных амплитуд уединенных волн, сопровождающих антиферромагнитные вихри [10]

ния вихря вдоль ДГ от скорости движения самой границы. Скорость движения вихря вдоль границы сначала возрастает с ростом скорости границы, достигает своего максимума и уменьшается, следуя закону:

$$v^2 + u^2 = c^2, \tag{2}$$

где $c = 20$ км/с — максимальная скорость движения ДГ в ортоферрите иттрия.

К сожалению, экспериментальные зависимости $u(v)$ и $w(v)$ не удалось получить для скоростей движения доменной границы, меньших скорости звука (4 км/с). Ранее уже было отмечено, что генерация вихрей про-

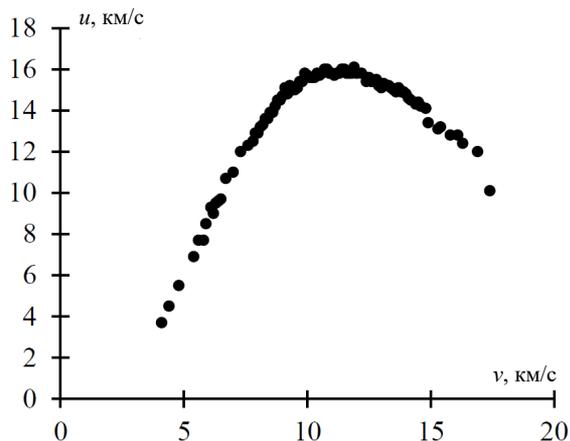


Рис. 3. Зависимость скорости вихря вдоль доменной границы u от скорости движения доменной границы v . При фиксированной скорости движения доменной границы значения u были усреднены для разных амплитуд уединенных волн, сопровождающих антиферромагнитные вихри [10]

исходит при скорости движения ДГ 12 км/с, поскольку при торможении граница сильно искривляется, определить положение уединенной волны, сопровождающей вихрь, было затруднительно.

Первой работой, посвященной теоретическому исследованию динамики магнитных вихрей в ДГ ортоферритов, была работа Е. Г. Екомасова и М. А. Шабалина [11]. Авторы получили зависимость $u(v)$, содержащую безразмерный параметр a_0 , который является отношением силы, продвигающей магнитный вихрь вдоль ДГ, к силе, которая его тормозит. Кривые, построенные для разных значений параметра a_0 , имеют максимум, положение которого с ростом величины a_0 смещается в сторону меньших значений v и больших значений u . Убывающие части экспериментальных и теоретических кривых, построенных для больших значений параметра a_0 , стремятся к кривой, которая описывается соотношением (2). Несмотря на то, что расчетные кривые подобны экспериментальной зависимости, нельзя сказать, что теоретические расчеты точно описывают экспериментальные данные [12]. Это расхождение особенно заметно на возрастающих участках зависимостей $u(v)$.

Другой подход к теоретическому описанию динамики АФМ вихрей в ДГ ортоферрита был предложен А. К. и К. А. Звездиными [13, 14]. В основе подхода лежит высказанное в работах [6, 10] предположение, что причиной движения АФМ вихрей со столь высокими скоростями может быть только гироскопическая сила. Согласно теории, гироскопическая сила в ортоферритах не равна нулю, а пропорциональна намагниченности подрешеток и полю Дзялошинского и обратно пропорциональна величине обменного поля в ортоферритах. В рамках этой теории аналитически была получена неявная зависимость $u(v)$ [13, 14]. Расчетные кривые имели начальный линейно возрастающий уча-

сток, максимум и убывающую часть, которая соответствует уравнению (2). Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования было выполнено в работе [15].

Зависимости $u(v)$, полученные в результате теоретических расчетов, которые были выполнены под руководством Е. Г. Екомасова и А. К. Звездина, подобны: все кривые начинаются из начала координат, имеют максимум и убывающую часть, которая подчиняется уравнению (2). При определенных значениях соответствующих констант теоретические кривые качественно согласуются с экспериментальными данными, но говорить о полном соответствии экспериментальных и расчетных зависимостей на всем диапазоне скоростей движения доменной границы нельзя. Поскольку результаты теоретического моделирования удовлетворительно описывают экспериментальные данные только при больших скоростях движения ДГ, была поставлена задача подобрать эмпирическую функцию, описывающую экспериментальные результаты по динамике АФМ вихрей для любых скоростей движения ДГ.

2. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Математически задача о нахождении аппроксимирующей функции сводится к подбору для функции, заданной таблично, аналитического выражения, которое приближенно описывает эту функцию. Обычно для приближенного изображения заданной функции $f(x)$ выбирают аппроксимирующую функцию $\varphi(x)$ из функций определенного вида, например, ищут $\varphi(x)$ в виде многочлена

$$\varphi(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (3)$$

или в виде

$$\varphi(x) = Ar^{rx} + Be^{sx} + \dots \quad (4)$$

требуя, чтобы функция $\varphi(x)$ наиболее близко приближалась к $f(x)$ на некотором определенном интервале ($a \leq x \leq b$) [16]. Существует несколько методов построения функций $\varphi(x)$, среди которых равномерное приближение и метод наименьших квадратов. В зависимости от способа, которым оценивается близость функций $f(x)$ и $\varphi(x)$, может получиться то или иное наилучшее приближение.

Согласно методу наименьших квадратов [16] наиболее употребительным является такое приближение $\varphi(x)$, для которого наименьшее значение имеет величина

$$M = \int_a^b (\varphi(x) - f(x))^2 dx. \quad (5)$$

Поскольку в эксперименте измерения проводят с определенным шагом, вид исходной функции является дискретным. Следовательно, для проведения дальнейших расчетов аппроксимирующую функцию $\varphi(x)$

можно задать аналогично (рис. 4). Таким образом, выражение (5) можно записать в виде:

$$M = \min \sum_{i=1}^N ((f(x_i) - \varphi(x_i))^2), \quad (6)$$

здесь $f(x_i)$ и $\varphi(x_i)$ — значения функций f и φ в точке x_i . N — число экспериментальных точек. В большинстве экспериментов, как правило, измеряемые величины имеют размерность, следовательно величина в общем случае также будет размерной.

Для реализации метода наименьших квадратов с применением численных методов отклонение экспериментальной зависимости $f(x)$ от аппроксимирующей $\varphi(x)$ можно рассматривать не только по вертикальной оси, как это сделано в выражении (6), а сразу по двум направлениям. На рис. 4 отклонение экспериментальных точек от аппроксимирующей кривой показано зелеными отрезками. Таким образом, в общем случае для вычисления значения M , характеризующего точность определения аппроксимирующей функции $\varphi(x)$, удобно использовать формулу:

$$M = \sum_{i=1}^N \min(((x_i - x_{ki})^2 + (f(x_i) - \varphi(x_{ki}))^2)), \quad (7)$$

здесь $f(x_i)$ и $\varphi(x_{ki})$ — значения функций f и φ в точке x_i и x_{ki} соответственно, на рис. 4 $k = 1, 2, 3, 4$.

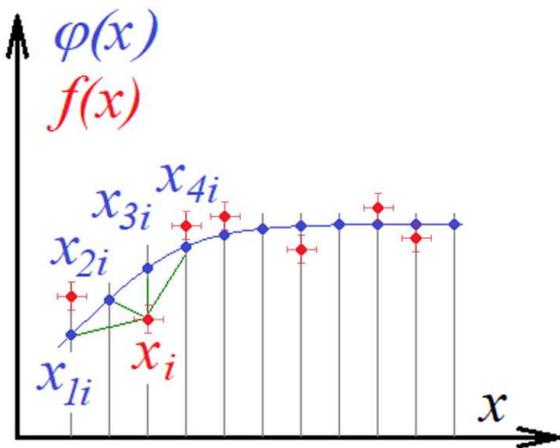


Рис. 4. Экспериментальная зависимость $f(x)$ и аппроксимирующая функция $\varphi(x)$. Для вычисления значения M , используя соотношение (7), для каждой экспериментальной точки с координатами $(x_i, f(x_i))$ вычисляют значения $(x_i - x_{ki})^2 + (f(x_i) - \varphi(x_{ki}))^2$, на рисунке $k = 1, 2, 3, 4$, затем находят минимальное среди них и используют его для вычисления MM по формуле (7)

Вид экспериментальной зависимости $w(v)$ проще, чем вид кривой $u(v)$ (рис. 2 и 3), поэтому для подбора аппроксимирующей функции была выбрана именно зависимость $w(v)$. Поскольку величины v , u и w связаны между собой уравнением (1), подобрав функцию $w(v)$,

можно рассчитать кривую $u(v)$ и сравнить полученный результат с экспериментальными данными [17]. На рис. 2 представлена зависимость $w(v)$, усредненная для разных значений амплитуд уединенных волн. Для получения эмпирической зависимости $w(v)$, соответствующей экспериментальным данным (рис. 2), были использованы следующие предположения:

1. $w(0) = 0$;
2. максимальное значение полной скорости АФМ вихря не превосходит предельной скорости движения ДГ в ортоферритах: $w(v \rightarrow \infty) = 20$ км/с ($w(v=20$ км/с)=20 км/с);
3. зависимость $w(v)$ является неубывающей, т.е. $w'(v) \geq 0$.

Переходим к безразмерным величинам $x = v/c$ и $y = w/c$, где $c = 20$ км/с и получаем зависимость $y(x)$, обладающую следующими свойствами:

1. $y(0) = 0$;
2. $y(x \rightarrow 1) = 1$;
3. $y'(x) \geq 0$.

Далее рассмотрим 3 вида рациональных функций, удовлетворяющих этим условиям (табл. 1). Круг этих функций можно расширить, включив в рассмотрение, например, экспоненциальную и тригонометрические функции, но на окончательные выводы это не повлияет. Во второй колонке табл. 1 представлены аналитические выражения для функций, каждое из которых содержит единственный безразмерный подгоночный параметр (a_i, b_i, d_i) . Для каждого вида функций записаны зависимости, содержащие аргумент x в разных степенях. В правой колонке представлены эскизы графиков функции $y = \varphi(x)$, соответствующих разным видам зависимости от аргумента: линейная зависимость, квадратичная и т.д. Легко заметить, что для разных видов зависимостей вид начального участка отличается.

Далее, изменяя значения подгоночных параметров, в каждом классе функций можно определить такую зависимость, для которой величина M будет наименьшей, т.е. аппроксимирующая функция лучше всего описывает экспериментальные данные. В табл. 2 представлены результаты расчетов для тех функций, у которых значение параметра M в каждой группе минимально. Для разных видов функций величина M меняется от 0.013 до 0.027.

Следует отметить, что вид аппроксимирующих функций можно усложнить, вводя дополнительные подгоночные параметры. Например, вместо функции

$$y = \frac{x^4}{x^4 + a_4} \quad (8)$$

использовать функцию вида

$$y = \frac{x^4}{x^4 + a_{43} + a_{40}}. \quad (9)$$

Усложнение вида аппроксимирующей функции позволяет уменьшить значение M от 0.027 до 0.008, однако ниже будет показано, что на итоговый вывод это не влияет.

На рис. 5 представлена экспериментальная зависимость $w(v)$ и аппроксимирующие функции $w(v)$, вычисленные с использованием данных из табл. 2: $w(v) = \frac{cv^4}{v^4 + c^4 a_4}$, где $a_4 = 0.0072$ (синяя кривая); $w(v) = \frac{cv^4}{v^4 + cv^3 a_{43} + c^4 a_{40}}$, где $a_{43} = -0.02$, $a_{40} = 0.0092$ (черная пунктирная кривая); $w(v) = c\sqrt{\frac{v^5}{v^5 + c^5 b_5}}$, где $b_5 = 0.0075$ (зеленая кривая); $w(v) = \frac{cv^3}{\sqrt{v^6 + c^6 d_3}}$, где $d_3 = 0.0032$ (красная кривая). Видно, что все расчетные кривые близко расположены друг к другу и достаточно хорошо соответствуют экспериментальным данным.

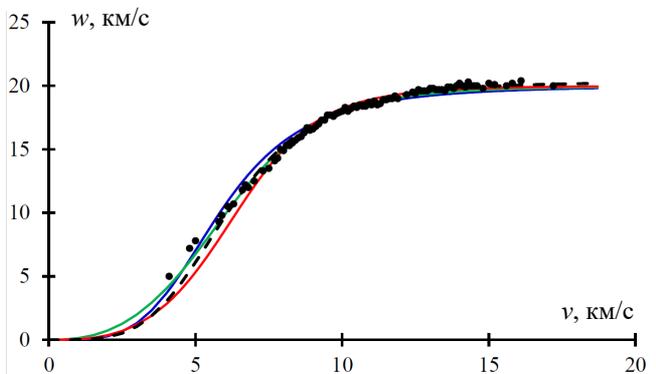


Рис. 5. Экспериментальная зависимость полной скорости вихря w от скорости движения доменной границы v (черные точки) и аппроксимирующие функции $w(v)$: $w(v) = \frac{cv^4}{v^4 + c^4 a_4}$, где $a_4 = 0.0072$ (синяя кривая); $w(v) = \frac{cv^4}{v^4 + cv^3 a_{43} + c^4 a_{40}}$, где $a_{43} = -0.02$, $a_{40} = 0.0092$ (черная пунктирная кривая); $w(v) = c\sqrt{\frac{v^5}{v^5 + c^5 b_5}}$, где $b_5 = 0.0075$ (зеленая кривая); $w(v) = \frac{cv^3}{\sqrt{v^6 + c^6 d_3}}$, где $d_3 = 0.0032$ (красная кривая)

Используя зависимости $w(v)$, представленные в табл. 2, можно получить кривые $u(v)$. На рис. 6 показаны экспериментальная и расчетные зависимости $u(v)$. Расчеты были выполнены, используя соотношение (1) $u(v) = \sqrt{w^2(v) - v^2}$, здесь $w(v) = \frac{cv^4}{v^4 + c^4 a_4}$, где $a_4 = 0.0072$ (синяя кривая); $w(v) = \frac{cv^4}{v^4 + cv^3 a_{43} + c^4 a_{40}}$, где $a_{43} = -0.02$, $a_{40} = 0.0092$ (черная пунктирная кривая); $w(v) = c\sqrt{\frac{v^5}{v^5 + c^5 b_5}}$, где $b_5 = 0.0075$ (зеленая кривая); $w(v) = \frac{cv^3}{\sqrt{v^6 + c^6 d_3}}$, где $d_3 = 0.0032$ (красная кривая). Все расчетные кривые подобны и соответствуют экспериментальным данным.

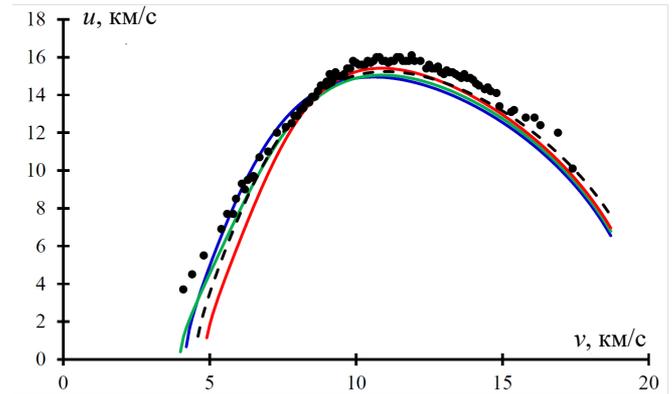


Рис. 6. Экспериментальная зависимость скорости вихря вдоль доменной границы u от скорости движения доменной границы v (черные точки) и аппроксимирующие функции $u(v)$, вычисленные по формуле $u(v) = \sqrt{w^2(v) - v^2}$, где $w(v) = \frac{cv^4}{v^4 + c^4 a_4}$, где $a_4 = 0.0072$ (синяя кривая); $w(v) = \frac{cv^4}{v^4 + cv^3 a_{43} + c^4 a_{40}}$, где $a_{43} = -0.02$, $a_{40} = 0.0092$ (черная пунктирная кривая); $w(v) = c\sqrt{\frac{v^5}{v^5 + c^5 b_5}}$, где $b_5 = 0.0075$ (зеленая кривая); $w(v) = \frac{cv^3}{\sqrt{v^6 + c^6 d_3}}$, где $d_3 = 0.0032$ (красная кривая)

Поскольку $u(v) = \sqrt{w^2(v) - v^2}$, может существовать область значений скоростей доменной границы $v < v_{cr}$, где функция неопределена (рис. 6). Значения v_{cr} , вычисленные для разных видов функций $w(v)$, показаны в правой колонке табл. 2. Почти все эти значения близки к 4 км/с — величине скорости звука в ортоферрите иттрия.

Таким образом, вид зависимости $u(v)$ и наличие критической скорости v_{cr} по сути является косвенным доказательством того, что АФМ вихри не могут существовать внутри ДГ, если она движется со скоростью меньшей или равной скорости звука.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Безусловно, этот вывод, который сделан на основе подбора аппроксимирующих функций, нельзя считать строгим. Однако наличие некоторой критической скорости движения доменной границы, ограничивающей область существования АФМ вихрей внутри нее, следует из целого ряда экспериментов.

Известно, что при изменении скорости движения ДГ меняется ее видимая ширина (рис. 7), а следовательно, и ее внутренняя структура [18]. Ранее было отмечено, что генерация вихрей внутри ДГ происходит при локальном торможении границы, движущейся со сверхзвуковой скоростью ($v = 12$ км/с). Изменение скорости доменной границы ведет к изменению скорости вихря. При уменьшении скорости границы до скорости звука, ее видимая ширина резко уменьшается, следовательно меняется ее структура, что может приводить к исчезновению АФМ вихрей. При уменьшении скорости

Таблица 1. Виды функций, использованные для выбора аппроксимирующей функции для зависимости $y(x)$

Вид функции	Аналитическое представление	Эскизы графиков
Дробная рациональная функция	$y = \frac{x}{x+a_1}$	
	$y = \frac{x^2}{x^2+a_2}$	
	$y = \frac{x^3}{x^3+a_3}$	
	$y = \frac{x^4}{x^4+a_4}$	
Корень из дробной рациональной функции	$y = \sqrt{\frac{x}{x+b_1}}$	
	$y = \sqrt{\frac{x^3}{x^3+b_3}}$	
	$y = \sqrt{\frac{x^5}{x^5+b_5}}$	
	$y = \sqrt{\frac{x^7}{x^7+b_7}}$	
Функция, содержащая корень в знаменателе	$y = \frac{x}{\sqrt{x^2+d_1}}$	
	$y = \frac{x^2}{\sqrt{x^4+d_2}}$	
	$y = \frac{x^3}{\sqrt{x^6+d_3}}$	
	$y = \frac{x^4}{\sqrt{x^8+d_4}}$	

Таблица 2. Аппроксимирующие функции и их характеристики

Вид функции	Аналитическое представление	Результаты расчетов
Дробно-рациональная функция	$y = \frac{x^4}{x^4+a_4}$	$a_4 = 0.0072, M = 0.027, v_{cr} = 4.2$
	$y = \frac{x^4}{x^4+a_{43}x^3+a_{40}}$	$a_{43} = -0.02, a_{40} = 0.0092, M = 0.008, v_{cr} = 4.5$
Корень из дробно-рациональной функции	$y = \sqrt{\frac{x^5}{x^5+b_5}}$	$b_5 = 0.0075, M = 0.013, v_{cr} = 4.0$
Функция, содержащая корень в знаменателе	$y = \frac{x^3}{\sqrt{x^6+d_3}}$	$d_3 = 0.0032, M = 0.015, v_{cr} = 4.8$

движения ДГ ниже скорости звука, видимая ширина границы возрастает, но ее величина отличается от той, которую имела граница при движении со скоростью, превышающей звуковую. Это свидетельствует об изменении структуры ДГ при преодолении ей звукового барьера. Этот факт также косвенно подтверждается наличием горизонтального участка на зависимости скорости движения доменной границы от величины внешнего магнитного поля, когда скорость движения границы равна скорости звука [2, 9]: при разгоне доменной границы до скорости звука энергия внешнего магнитного поля в некотором интервале полей идет не на разгон доменной границы, а на изменение ее внутренней структуры, и только после окончания этого преобразования скорость движения границы резко меняется с 4 до 12 км/с [9].

Другая серия экспериментов, косвенно подтверждающих невозможность существования АФМ вихрей внутри ДГ, если она движется со скоростью равной или меньшей скорости звука, посвящена исследованиям взаимодействия уединенной волны, сопровождающей АФМ вихрь и движущейся вдоль ДГ, скорость которой превышает скорость звука, с той частью границы, которая еще не преодолела звуковой барьер [19, 20].

В работе [19] было показано, что угол наклона переднего фронта уединенной волны, сопровождающей динамический АФМ вихрь и движущейся вдоль сверхзвуковой части ДГ, не зависит от расстояния между этой волной и той частью границы, которая движется со скоростью звука если это расстояние превышает 30 мкм. При приближении уединенной волны к звуко-

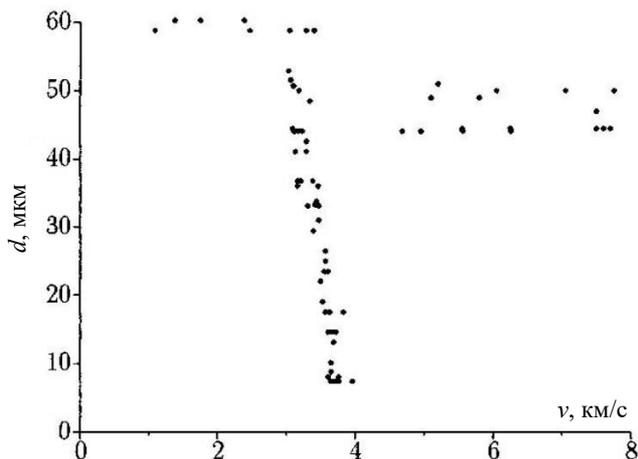


Рис. 7. Зависимость видимой толщины доменной границы от скорости ее движения [18]

вой части ДГ угол наклона переднего фронта уменьшается, что свидетельствует об изменении структуры доменной границы. Авторы работы [20] наблюдали отражение уединенной волны, сопровождающей АФМ вихрь и движущейся вдоль сверхзвуковой части ДГ от той части, которая еще продолжает двигаться со скоростью звука. Уединенная волна, сопровождающая АФМ вихрь, не переходит на ту часть ДГ, которая движется со скоростью звука, а остается на сверхзвуковой части границы, и меняет направление движения на противоположное.

Иначе говоря, несмотря на невозможность экспериментально наблюдать изменение внутренней структуры динамической доменной границы ортоферрита иттрия, ранее было показано [19, 20], что АФМ вихри внутри ДГ не могут существовать, если ее скорость меньше или равна скорости звука. Аналогичный вывод, как оказалось, можно сделать, используя функцию, аппроксимирующую экспериментальные данные по динамике АФМ вихрей внутри ДГ ортоферрита иттрия. Рассматривая разные виды функций, которые аппроксимируют зависимость полной скорости движения вихря от скорости движения доменной границы, и зная связь между скоростью вихря вдоль доменной границы, полной скоростью вихря и скоростью границы, была подобрана зависимость скорости вихря вдоль доменной границы от скорости самой границы $u(v)$. Для разного вида аппроксимирующей функции и числа подгоночных параметров для всех видов рассмот-

ренных функций была получена величина критической скорости доменной границы v_{cr} , которая ограничивает область определения функции $u(v)$: если скорость движения доменной границы $v < v_{cr}$, функция $u(v)$ не определена. Следует отметить, что величина v_{cr} для разных видов аппроксимирующих функций близка к скорости звука в ортоферритах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Иногда в условиях реального эксперимента невозможно измерить значения величин во всем интересующем диапазоне, доступным может оказаться только некоторый ограниченный интервал, поэтому задача о подборе функции, аппроксимирующей экспериментальные результаты, интересна сама по себе. При исследовании динамики АФМ вихрей в ДГ ортоферрита иттрия, были выделены особенности зависимости полной скорости вихря от скорости движения доменной границы, на основе которых были выбраны несколько функций, содержащих один или два подгоночных параметра. Значения этих параметров были определены по методу наименьших квадратов. С помощью полученных аппроксимирующих функций, используя связь между скоростью движения вихря и скоростью доменной границы, была вычислена зависимость скорости вихря вдоль доменной границы от скорости движения границы. Было показано, что существует некоторая критическая скорость движения доменной границы, при уменьшении скорости до этой величины вихри внутри ДГ исчезают. Полученные значения критической скорости для разных видов аппроксимирующих функций близки к скорости звука в ортоферритах. Ранее экспериментально было показано, что при преодолении звукового барьера изменяется видимая ширина ДГ, что свидетельствует об изменении ее внутренней структуры. Кроме того, при исследовании взаимодействия уединенной волны, сопровождающей АФМ вихрь и движущейся вдоль сверхзвуковой части ДГ, с той частью границы, которая движется со скоростью звука, наблюдали уменьшение угла наклона переднего фронта этой волны при приближении к звуковому участку границы, а также отражение этой волны от части границы, движущейся со скоростью звука. Таким образом, ранее сделанный вывод о невозможности существования АФМ вихря внутри доменной границы, скорость которой меньше скорости звука, был подтвержден, для разных функций, аппроксимирующих экспериментальную зависимость полной скорости вихря от скорости движения доменной границы.

[1] Malozemov A.P., Slonczewski J.C. Magnetic Domain Walls in Bubbles Materials. New York: Academic Press, 1979.

[2] Bar'jakhtar V.G., Chetkin M.V., Ivanov B.A., Gadetskiy S.N. Dynamics of Topological Magnetic Solitons.

(Springer tracts in modern physics, Berlin), vol. 129. 1994.

[3] Choi Youn-Seok, Kim Sang-Koog, Lee Ki-Suk, Yu Young-Sang. // Appl. Phys. Lett. 2008. **93**. P. 182508.

[4] Weigand M., Waeyenberge B.V., Vansteenkiste A., Curcic M., Sackmann V., Stoll H., Tylliszczak T.,

- Kaznatcheev K., Bertwistle D., Woltersdorf G., Back C.H., Schutz G.* // Phys. Rev. Letters. 2009. **102**. P. 077201.
- [5] *Chetkin M.V., Kurbatova Yu.N., Shapaeva T.B., Boschegovskiy O.A.* // Phys. Lett. A. 2005. **337**. P. 235.
- [6] *Chetkin M.V., Kurbatova Yu.N., Shapaeva T.B.* // JMMM. 2009. **321**, № 7. P. 800.
- [7] *Рандошкин В.В., Червоненкис А.Я.* Прикладная магнитооптика. М.: Энергоатомиздат, 1990.
- [8] *Четкин М.В., Де ла Кампа А.* // Письма в ЖЭТФ. 1978. **27**, № 3. С. 168.
- [9] *Баряхтар В.Г., Иванов Б.А., Четкин М.В.* // УФН. 1985. **146**, № 3. С. 417.
- [10] *Четкин М.В., Курбатова Ю.Н., Шапаева Т.Б., Борщевский О.А.* // ЖЭТФ. 2006. **130**, № 1(7). С. 181.
- [11] *Екомасов Е.Г., Шабалин М.А.* // ФТТ. 2001. **43**, № 7. С. 1211.
- [12] *Chetkin M.V., Kurbatova Yu.N., Shapaeva T.B.* // JMMM. 2003. **258-259**. P. 15.
- [13] *Звездин А.К., Звездин К.А.* // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2010. № 8. С. 22.
- [14] *Звездин А.К., Звездин К.А.* // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2010. № 8. С. 33.
- [15] *Chetkin M.V., Kurbatova Yu.N., Shapaeva T.B.* // JMMM. 2012. **324**. P. 3576.
- [16] *Бронштейн И. Н., Семендяев К. А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1986.
- [17] *Четкин М.В., Курбатова Ю.Н., Шапаева Т.Б., Борщевский О.А.* // Изв. РАН, сер. физическая. 2007. **71**, № 11. С. 1535.
- [18] *Chetkin M.V., Kurbatova Yu.N., Akhutkina A.I.* // Journal of Appl.Phys. 1996. **79**, № 8. P. 6132.
- [19] *Chetkin M.V., Kurbatova Yu.N., Shapaeva T.B.* // Solid State Phenomena. 2015. **233-234**. P. 435.
- [20] *Четкин М.В., Курбатова Ю.Н., Шапаева Т.Б., Борщевский О.А.* // Письма в ЖЭТФ. 2007. **85**, № 4. С. 232.

Approximation of experimental data on the antiferromagnetic vortices dynamics in the yttrium orthoferrite domain wall

T. B. Shapaeva^a, E. F. Khudaygulova^b

*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow, 119991, Russia E-mail: ^ashapaeva@mail.ru, ^bhudaygulovaelya@gmail.com*

Using the least squares method, approximating functions for the experimental dependence of the total velocity of the antiferromagnetic vortices on the domain wall velocity were selected. Using the obtained functions and the relation between the vortex velocities and the domain wall velocity, the dependences of the vortex velocity along the domain wall u on the domain wall velocity v were calculated. It was found that if the velocity of the domain wall is less than a certain critical value, the dependence $u(v)$ is not determined. This confirms the earlier conclusion about the impossibility of the antiferromagnetic vortices existence inside the domain wall if it moves at a speed less than the sound velocity.

PACS: 75.40.Gb, 75.60.Ch, 75.60.Jk, 75.70.Kw.

Keywords: antiferromagnetic vortices, domain walls and magnetic vortices dynamics, approximation of experimental data
Received 09 August 2022.

Сведения об авторах

1. Шапаева Татьяна Борисовна — канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: shapaeva@mail.ru.
2. Худайгулова Эльвира Фанильевна — магистр 2г/о; тел.: (495) 939-50-40, e-mail: hudaygulovaelya@gmail.com.