

УДК 53.082; 537.84
PACS 07.55.Jg, 75.50.Mm

Метод дифференциальной прогонки – наиболее точный метод измерения намагниченности

А. В. Лебедев

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия
lav@icmm.ru

Сравниваются результаты измерения кривых намагничивания образцов магнитной жидкости, выполненные тремя различными методами: баллистическим, дифференциальной прогонкой и вибрационным магнетометром. Оказалось, что метод вибрирующего образца дает сильно заниженные значения намагниченности по сравнению с двумя другими методами. Занижение результатов объясняется образованием под действием поля агрегатов из частиц, которые имеют меньшую амплитуду колебаний по сравнению с контейнером. Баллистический метод дает значения намагниченности, заниженные на несколько процентов по отношению к методу дифференциальной прогонки. Занижение результатов объясняется тем, что агрегаты не успевают сформироваться за ограниченное время измерений при включении поля. Дополнительно тремя методами измерены кривые намагничивания образца магнитной жидкости на основе отверждённой эпоксидной смолы. В этом случае расхождение между результатами существенно меньше. Однако полного совпадения не наблюдалось. Точному совпадению кривых намагничивания, полученных разными методами измерений, в случае твердого образца мешает наличие в образце крупнодисперсных частиц, время релаксации намагниченности которых превышает время измерений.

Ключевые слова: магнитная жидкость; метод дифференциальной прогонки; баллистический метод; метод вибрирующего образца

Поступила в редакцию 13.10.2025; после рецензии 20.11.2025; принята к опубликованию 03.12.2025

The differential sweep method as the most accurate method for measuring of magnetization

A. V. Lebedev

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia
lav@icmm.ru

The paper compares the magnetization curves of magnetic fluid samples measured using three different methods: the ballistic method, differential sweep, and the vibrating sample method with the use of a vibrating magnetometer. The vibrating sample method was found to yield significantly lower magnetization values than the other two methods. This lowered result is explained by the formation under the action of the field of particle aggregates that have a smaller oscillation amplitude compared to the container. The ballistic method yields magnetization values that are several percent lower than those produced by the differential sweep method. This lowered result is explained by the fact that aggregates do not have time to form during the limited measurement time when the field is turned on. Additionally, the three methods were applied to measure the magneti-

zation curves of a magnetic fluid sample based on cured epoxy resin. In this case, the discrepancy between the results was significantly smaller. However, complete agreement was not observed. In the case of a solid sample, the exact coincidence of the magnetization curves obtained by different measurement methods is hampered by the presence of coarse particles in the sample, the magnetization relaxation time of which exceeds the measurement time.

Keywords: magnetic fluid; differential sweep method; ballistic method; vibrating sample method

Received 13 October 2025; revised 20 November 2025; accepted 03 December 2025

doi: 10.17072/1994-3598-2025-4-42-48

1. Введение

В шестидесятых годах прошлого века были синтезированы коллоидные растворы мелкодисперсных магнетиков, получившие название магнитные жидкости [1]. Новый созданный объект, сочетая свойства ньютоновской жидкости и ферромагнетика, оказался весьма интересным как с точки технических приложений, так и с точки зрения фундаментальных исследований на стыке гидродинамики и магнетизма. Возникшее таким образом новое научное направление получило название феррогидродинамика [2].

С самого момента создания магнитных жидкостей одним из методов их исследования было измерение и анализ кривых намагничивания. В основном в то время были известны и применялись такие методы, как метод вибрирующего образца и баллистический метод. Однако вопрос об их адекватной применимости к магнитным жидкостям не исследовался.

В предлагаемой работе анализируются результаты измерения кривых намагничивания классических магнитных жидкостей и твердого образца на основе эпоксидной смолы. Кривые намагничивания измеряются тремя различными методами: баллистическим, вибрационным магнетометром и методом дифференциальной прогонки.

Стимулом к написанию настоящей работы послужило обращение коллег из Московского государственного университета с просьбой о контролном измерении кривых намагничивания методом дифференциальной прогонки. Результаты, полученные ими на вибрационном магнетометре и баллистическим методом, почти в два раза отличались друг от друга. Таким образом, метод дифференциальной прогонки должен был разрешить это противоречие.

2. Методы измерения кривых намагничивания

2.1. Баллистический метод

Баллистический метод является исторически первым методом измерения намагниченности. Основной идеей является интегрирование ЭДС, индуцируемой в измерительной катушке намагничива-

ваемым образцом. Равенство между изменением магнитного потока и интегралом от напряжения прямо следует из закона индукции Фарадея.

Первоначально для регистрации сигнала в баллистическом методе измерения намагниченности использовались гальванометры. Сигнал с измерительной катушкой, намотанной поверх намагничиваемого образца, подавался на вход гальванометра. При намагничивании образца через рамку гальванометра протекал короткий импульс тока (меньше периода колебаний рамки), пропорциональный ЭДС индукции в катушке. Наблюдаемый затем максимальный отброс рамки гальванометра индицировал протекший заряд или изменение магнитного потока в образце. Именно по принципу работы гальванометра метод и получил свое название.

Впервые для измерения магнитного потока баллистический гальванометр был применен в экспериментах Столетова [3]. Позже были разработаны более совершенные приборы – так называемые веберметры. Эти приборы представляют собой либо аналоговые интеграторы со стрелочной индикацией показаний, либо более совершенные цифровые интеграторы.

2.2. Метод вибрационного магнетометра

Метод вибрирующего образца является на сегодня, пожалуй, самым популярным среди экспериментаторов. Практически каждая лаборатория, занимающаяся магнитными измерениями, стремится заполучить в свое распоряжение вибрационный магнетометр.

Принцип работы вибрационного магнетометра основывается на измерении полей размагничивания исследуемого образца. Образец при этом совершает возвратно-поступательные колебания. Тогда в измерительных катушках, расположенных вблизи образца, индуцируется напряжение, по величине которого можно судить о намагниченности образца [4].

Из недостатков вибрационного магнетометра следует указать на сильное влияние размагничивающего фактора образца и механические возмущения от вибраций.

2.3. Метод дифференциальной прогонки

Метод дифференциальной прогонки был разработан восьмидесятых годах – в самом начале рабо-

ты нашей группы магнитных жидкостей в составе теоретического отдела Института механики сплошных сред. Основная идея была предложена Александром Федоровичем Пшеничниковым. В отличие от известных методов, напрямую измеряющих величину намагниченности, в методе дифференциальной прогонки экспериментально измеряется зависимость дифференциальной восприимчивости образца магнитной жидкости от напряженности внешнего постоянного поля. Полная кривая намагничивания получается затем путем численного интегрирования зависимости $\chi(H)$.

Схема измерения дифференциальной восприимчивости в подмагничивающем поле во многом аналогична измерению начальной восприимчивости в переменном поле [5]. Здесь также образец жидкости в цилиндрической ампуле помещается внутрь измерительной катушки. Последовательно с измерительной включается дополнительная катушка для компенсации сигнала в отсутствие образца жидкости. Она же используется для контроля амплитуды переменного зондирующего поля.

Обе катушки располагаются параллельно одна другой во внешнем постоянном магнитном поле. Первоначально внешнее постоянное поле создавалось с помощью электромагнита. Позже была сконструирована установка, в которой магнитное поле создает мощный соленоид с жидкостным охлаждением [6]. Использование соленоида исключает влияние полюсных наконечников ярма и позволяет корректно учитывать размагничивающий фактор образцов.

Магнитное поле состоит из двух компонент: постоянной намагничивающей и зондирующей переменной. Частота переменного поля в зависимости от свойств образца выбирается в диапазоне 0.1–10 Гц. Амплитуда поля в слабых намагничивающих полях составляет около 200 А/м. С ростом постоянного поля амплитуда зондирующего поля увеличивается до 2 кА/м.

Первоначально регистрация сигналов производилась с помощью самописца. Сейчас используется 24-разрядный АЦП, сопряженный с компьютером. Случайная погрешность измерения магнитных параметров этим методом оценивается в 0.2 %. Систематическая погрешность находится на уровне 0.5 %.

3. Результаты измерений образцов магнитных жидкостей

3.1. Сравнение результатов других авторов с методом дифференциальной прогонки

Для сравнительных измерений кривых намагничивания было прислано два образца магнитной жидкости близкой концентрации на двух разных основах: минеральное и синтетическое масло. Об-

разцы жидкостей были синтезированы в Ивановском энергетическом университете Игорем Михайловичем Арефьевым. К сожалению, данных о компонентах образцов он не предоставил. Намагниченности насыщения, измеренные методом дифференциальной прогонки, равнялись 9.30 кА/м и 9.41 кА/м соответственно. В дальнейшем речь пойдет только об образце на основе синтетического масла. Именно для него известны результаты измерения кривой намагничивания, полученные другими исследователями.

Результаты измерений кривой намагничивания образца жидкости на основе синтетического масла представлены на рис. 1. Хорошо видно, что никакого совпадения результатов нет и близко. Расхождение между кривыми достигает десятков процентов. На этом фоне становится понятным желание коллег из МГУ внести ясность в вопрос о магнитных свойствах их образцов магнитных жидкостей.

На рис. 1 верхняя кривая отражает результаты баллистических измерений. Измерения были выполнены в Минском политехническом университете с помощью аналогового веберметра Ф190. Нижняя кривая соответствует измерениям намагниченности на вибрационном магнитометре Lake Shore VSM 6804. Измерения выполнялись в центре коллективного пользования Красноярского института физики СО РАН. Средняя сплошная линия с точками является результатом измерений кривой намагничивания, выполненных в нашей лаборатории методом дифференциальной прогонки.

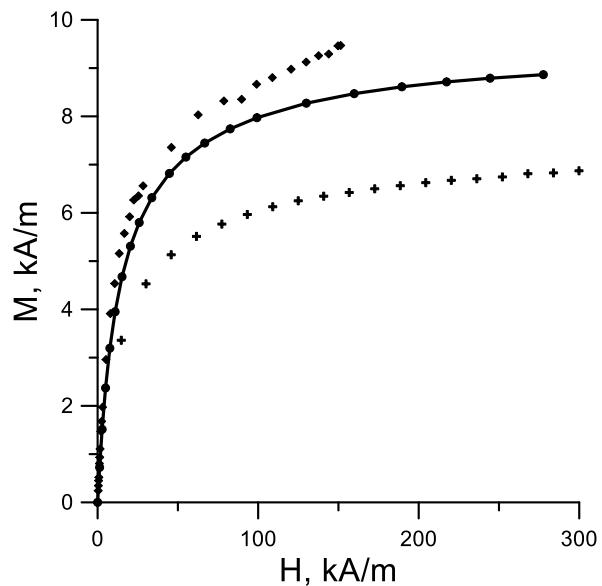


Рис. 1. Сравнение результатов измерений кривой намагничивания жидкости на основе синтетического масла. Сплошная кривая с точками – метод дифференциальной прогонки, ромбы сверху – результаты измерений в Минске, кресты снизу – результаты из Красноярска

Существенное занижение величины намагниченности, полученное на вибрационном магнето-

метре, в принципе не является неожиданным. В нашей недавней работе [7] было показано, что вибрационный метод измерения намагниченности и должен давать заниженные значения намагниченности. Занижение связано с образованием в магнитной жидкости агрегатов из крупных частиц, амплитуда колебания которых меньше амплитуды контейнера. В данном случае большее расхождение с результатами дифференциальной прогонки вызвано, по-видимому, большей амплитудой и частотой вибраций образца в серийном магнетометре по сравнению с магнетометром, изготовленным в ИМСС.

Более странным выглядит существенное расхождение между баллистическими измерениями и дифференциальной прогонкой. Методика баллистических измерений хорошо отработана и применяется в физике магнитных явлений с самого начала её становления. Метод дифференциальной прогонки фактически является логическим развитием баллистического метода в современных условиях всеобщей цифровизации физических измерений. Аналоговое интегрирование ЭДС индукции баллистическим гальванометром (веберметром) в данном случае заменяется численным интегрированием. Подобная замена позволяет исключить такие погрешности, как дрейф нуля, шумы и т.д.

Для выяснения вопроса о надёжности результатов, полученных методом дифференциальной прогонки, были выполнены также измерения кривых намагничивания баллистическим методом и на вибрационном магнетометре в условиях нашей лаборатории. Кривые измерялись как у присланных образцов магнитной жидкости, так и у образца на основе отверждённой эпоксидной смолы, который ранее использовался для сравнения метода дифференциальной прогонки и вибрационного магнетометра [7].

3.2. Результаты, полученные независимо в лаборатории динамики дисперсных систем ИМСС УрО РАН

Дополнительно к измерениям методом дифференциальной прогонки выполнены измерения кривых намагничивания баллистическим методом и на вибрационном магнетометре. Для баллистических измерений намагниченности жидкости использовалось оборудование установки для дифференциальной прогонки [6]. Магнитное поле в соленоиде коммутиировалось по схеме «Вкл. – Выкл.» с помощью ключа. Выходной сигнал с измерительных катушек регистрировался либо с помощью аналогового веберметра Ф191, либо цифрового Ф5050.

Предварительно была выполнена проверка точности измерений веберметров по стандартной схеме дифференцирующей цепочки [8]. Схема проверки представлена на рис. 2. При переключении ключа К на выходе схемы будут получены экспо-

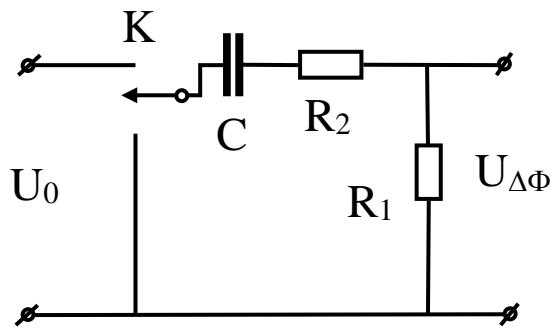


Рис. 2. Схема проверки веберметров. $C = 1 \text{ мкФ}$, $R_1 = 10 \text{ Ом}$, $R_2 = 10 \text{ кОм}$

ненциально затухающие импульсы положительной и отрицательной полярности. Интегральная величина напряжения (магнитный поток) при этом составит:

$$\Delta\Phi = U_0 CR_1$$

Точность задания образцовой величины магнитного потока определяется емкостью C и опорным сопротивлением R_1 . Для этого были выбраны элементы класса точности 0.1. Для питания цепи использовался аккумулятор напряжением 12 В. Это лучший способ избежать пульсаций и наводок. Величина напряжения аккумулятора U_0 контролировалась цифровым вольтметром.

При поверке веберметров выяснилось, что показания Ф5050 точно соответствуют заданной величине. Показания веберметра Ф191 потребовали коррекции на 8%.

На рис. 3 результаты баллистических измерений кривой намагничивания образца магнитной жидкости сравниваются с результатами, полученными методом дифференциальной прогонки и вибрационным магнетометром.

Вибрационный магнетометр, сконструированный в нашей лаборатории, выполнен по ставшей уж классической схеме Фонера [9]. В отличие от экспериментов [7], для измерения кривых намагничивания образцов жидкостей МГУ потребовалось изготовить контейнер значительно большего объема $\sim 0.4 \text{ см}^3$. Остальные параметры остались без изменений.

Из рис. 3 хорошо видно, что значения намагниченности, полученные на вибрационном магнетометре, лежат ниже кривой, измеренной методом дифференциальной прогонки. Наблюданное расхождение было вполне ожидаемым. Правда, оно оказалось существенно меньше, чем расхождение с результатами, полученными в Красноярске. По-видимому, причина заключается в различии параметров магнетометров, таких как амплитуда и частота вибраций, форма контейнера с жидкостью. К сожалению, параметры магнетометра Lake Shore VSM 6804 нам не известны.

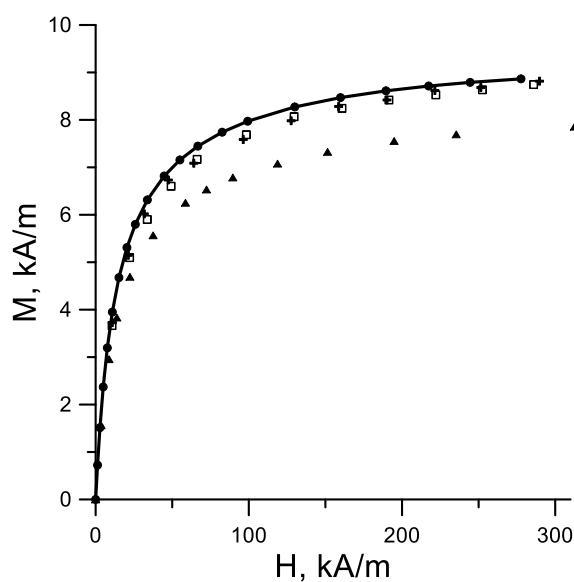


Рис. 3. Сравнение кривых намагничивания жидкости, измеренных методом дифференциальной прогонки (сплошная кривая и точки), на вибрационном магнитометре (треугольники) и баллистическим методом: кресты – Ф5050, квадраты – Ф191

Результаты измерения кривой намагничивания баллистическим методом незначительно отличаются от метода дифференциальной прогонки. Более наглядно это различие может быть представлено на зависимости намагниченности от обратного поля.

На рис. 4 производится сравнение результатов баллистического метода и дифференциальной прогонки в зависимости от обратного поля.

Из рисунка хорошо видно, что различие между

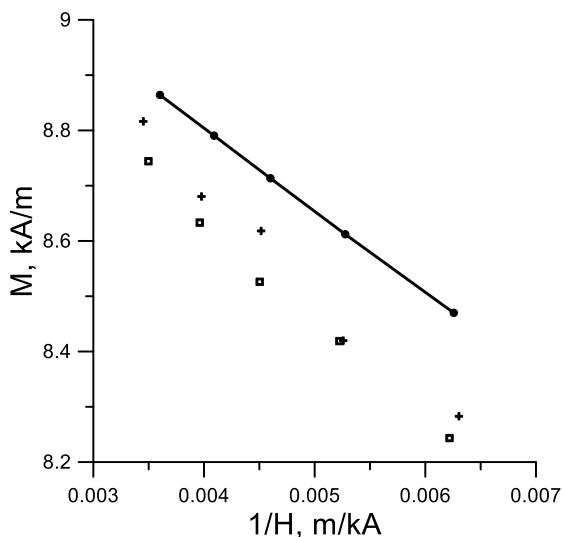


Рис. 4. Сравнение кривых намагничивания образца магнитной жидкости, полученных методом дифференциальной прогонки (прямая с точками), и баллистическим методом: кресты – Ф5050, квадраты – Ф191

двумя методами измерения намагниченности составляет среднем около 2%. Причем это расхождение быстро уменьшается с ростом поля. Расхождение же в величине намагниченности насыщения, которую определяют экстраполяцией до пересечения с осью ординат, совсем незначительно. Для баллистического метода экстраполяция дает значения намагниченности насыщения 9.45 kA/m при измерениях с помощью Ф5050 и 9.35 kA/m при измерениях с Ф191. Необходимая коррекция чувствительности Ф191 здесь выполнена. Экстраполяция метода дифференциальной прогонки приводит к результату 9.41 kA/m. Согласие если не отличное, то, по крайней мере, более чем хорошее.

Различие в величине намагниченности при конечной величине поля связано с медленным агрегированием частиц магнитной жидкости. Агрегаты не успевают сформироваться за конечное время измерений намагниченности в баллистическом методе. С увеличением поля скорость роста агрегатов возрастает и расхождение уменьшается. В методе дифференциальной прогонки магнитное поле меняется плавно, и агрегаты успевают сформироваться. В результате получаем немного большее значение намагниченности.

Другое важное отличие метода дифференциальной прогонки состоит в существенно меньшем разбросе экспериментальных точек. Точность аппроксимации результатов прямой линией в этом случае существенно выше, что не удивительно. Поскольку в баллистическом методе мы каждый раз меряем абсолютное значение намагниченности, а в методе дифференциальной прогонки измеряем приращение намагниченности на шаге изменения поля. Точность аппроксимации намагниченности от обратного поля играет большую роль в гранулометрическом анализе магнитных жидкостей [10].

3.3. Сравнение кривых намагничивания образца на основе отверждённой эпоксидной смолы

Было бы интересно сравнить результаты измерений разными способами кривых намагничивания твердого образца магнитной жидкости. Как это было сделано в работе [7], где сравнивались метод дифференциальной прогонки и вибрационный магнитометр. В данном случае агрегирование частиц исключается, и кривые намагничивания должны полностью совпадать. Для экспериментов был взят образец на основе отверждённой эпоксидной смолы [11], использованный в работе [7] для сравнения дифференциального и вибрационного методов измерения намагниченности.

На рис. 5 представлены результаты измерения кривой намагничивания отверждённого образца методом дифференциальной прогонки (сплошная линия) и баллистическим методом. Из рисунка хо-

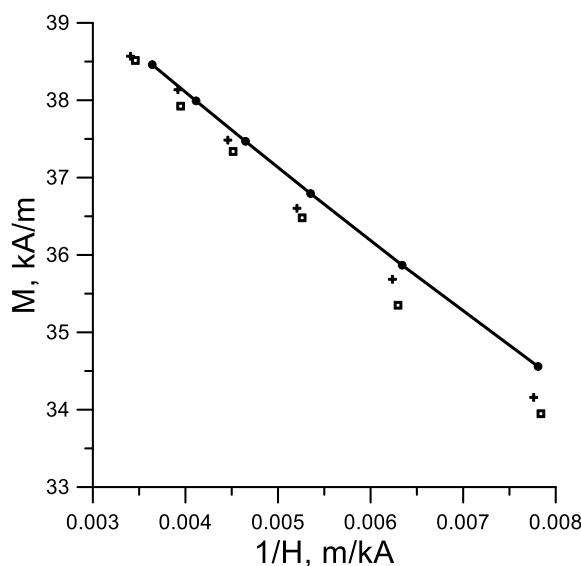


Рис. 5. Сравнение результатов измерения кривой намагничивания образца на базе отверждённой эпоксидной смолы: линия с точками – метод дифференциальной прогонки, кресты – веберметр F5050, квадраты - веберметр F191

прошо видно, что различие между кривыми намагничивания, измеренными разными способами, существенно уменьшилось, но все равно продолжает оставаться на уровне <1%. При этом все прямые, аппроксимирующие результаты измерений, сходятся практически в одну точку: 42.0 kA/m и 42.1 kA/m для баллистического метода при измерениях с помощью F191 и F5050 соответственно; и 41.8 kA/m для метода дифференциальной прогонки.

Причина наблюдаемого расхождения состоит в наличии в магнитной жидкости небольшой доли крупных частиц. Время релаксации их намагниченности в данном случае заметно превышает время измерений в баллистическом методе (порядка секунд). Поэтому магнитные моменты крупных частиц исключаются из суммарной величины намагниченности. Здесь опять-таки проявляется преимущество метода дифференциальной прогонки, в котором магнитное поле постоянно воздействует на образец, и все магнитные моменты частиц участвуют в измерениях.

4. Заключение

Выполнены измерения кривых намагничивания двух образцов магнитных жидкостей тремя различными методами: баллистическим, методом вибрирующего образца и методом дифференциальной прогонки. По сравнению с методом дифференциальной прогонки, два других метода измерения намагниченности дают заниженные результаты.

Для метода вибрирующего образца занижение может доходить до 30% в зависимости от условий измерений. Как уже было показано ранее, причи-

ной расхождений является образование в жидкости агрегатов из частиц, отстающих от колебаний контейнера.

Баллистический метод измерения намагниченности магнитной жидкости существенно меньше расходится с методом дифференциальной прогонки – различие составляет 2–3%. Основная причина погрешности состоит в ограниченном времени измерений, за которое не успевают сформироваться агрегаты из магнитных частиц.

При сравнительных измерениях тремя методами кривой намагничивания образца магнитной жидкости на основе отверждённой эпоксидной смолы полного совпадения результатов измерений также не наблюдалось. Хотя кривые существенно и сблизились, расхождение составляло в среднем менее 1 %. Причиной являются крупные частицы с большим временем релаксации намагниченности.

Автор благодарен Александре Сергеевне Виноградовой, научному сотруднику лаборатории физико-химической гидродинамики НИИ механики ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова», за предоставленные образцы магнитных жидкостей и формулировку проблемы.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Института механики сплошных сред УрО РАН в рамках госбюджетной темы № АААА-А20-120020690030-5. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Список литературы

- Шлиомис М. И. Магнитные жидкости // Успехи физических наук. 1974. Т. 112. Вып. 3. С. 435–458.
- Розенцвейг Р. Феррогидродинамика. М.: Мир, 1989. 357 с.
- Столетов А. Г. Исследование о функции намагничения мягкого железа. М.: Университетская типография, 1872. 81 с.
- Foner S. Vibrating-sample magnetometer // Review of Scientific Instruments. 1956. Т. 27. № 7. С. 548–557.
- Пшеничников А. Ф. Мост взаимной индуктивности для анализа магнитных жидкостей // Приборы и техника эксперимента. 2007. Т. 4. С. 88–93.
- Лебедев А. В. Измерение кривых намагничивания магнитных жидкостей: сравнение метода дифференциальной прогонки и вибрационного магнетометра // Приборы и техника эксперимента. 2024. № 5. С. 148–153.
- Лебедев А. В. О непригодности вибрационного магнетометра для измерения кривых намагничивания магнитных жидкостей // Вестник

- Пермского университета. Физика. 2022. № 2. С. 20–25. doi: 10.17072/1994-3598-2022-2-20-25
8. МИ 1930-88. Веберметры. Методика поверки. М.: Изд-во стандартов, 1989. 27 с.
 9. Foner S. Versatile and sensitive vibrating-sample magnetometer // Review of Scientific Instruments. 1959. Т. 30. № 7. С. 548–557.
 10. Пшеничников А. Ф., Лебедев А. В., Радионов А. В., Ефремов Д. В. Магнитная жидкость для работы в сильных градиентных полях // Коллоидный журнал. 2015. Т. 77. С. 207–213.
 11. Пшеничников А. Ф., Мехоношин В. В. Магнитные свойства отверженных ферроколлоидов // Физика твердого тела. 1998. Т. 40. № 6. С. 1062–1067.

References

1. Shliomis M. I. Magnetic fluids. *Sov. Phys. Usp.*, 1974, vol. 17, pp. 153–169.
2. Rosensweig R. E. *Ferrohydrodynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. 368 p.
3. Stoletov A. G. *Issledovanie o funktsii namagnicheniya miagkogo zheleza* [Research on the function of soft iron magnetization]. Moscow: Moscow University, 1872. 81 p. (In Russian)
4. Foner S. Vibrating-sample magnetometer. *Review of Scientific Instruments*, 1956, vol. 27, no. 7, pp. 548–557.
5. Pshenichnikov A. F. A mutual-inductance bridge for analysis of magnetic fluids. *Instruments and Experimental Techniques*, 2007, vol. 50, no. 4, pp. 509–514.
6. Lebedev A. V. Measuring magnetization curves of ferrofluids: comparison of the differential sweep method and a vibrating-sample magnetometer. *Instruments and Experimental Techniques*, 2024, vol. 67, no. 5, pp. 989–994.
7. Lebedev A. V. On the unsuitability of a vibrating sample magnetometer for measuring the magnetization curves of magnetic fluids. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2022, no. 2, pp. 20–25. doi: 10.17072/1994-3598-2022-2-20-25
8. MI 1930-88. *Vebermetry. Metodika poverki* [Webermeters. Verification Methodology]. Moscow: Izd-vo standartov, 1989. 27 p. (In Russian).
9. Foner S. Versatile and sensitive vibrating-sample magnetometer. *Review of Scientific Instruments*, 1959, vol. 30, no. 7, pp. 548–557.
10. Pshenichnikov A. F., Lebedev A. V., Radionov A. V., Efremov D. V. A magnetic fluid for operation in strong gradient fields. *Colloid Journal*, 2015, vol. 77, no. 2, pp. 196–201.
11. Pshenichnikov A. F., Mekhonoshin V. V. Magnetic properties of solidified ferrocolloids. *Physics of the Solid State*, 1998, vol. 40, no. 6, pp. 970–974.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Лебедев А. В. Метод дифференциальной прогонки – наиболее точный метод измерения намагниченности // Вестник Пермского университета. Физика. 2025. № 4. С. 42–48. doi: 10.17072/1994-3598-2025-4-42-48

Please cite this article in English as:

Lebedev A. V. The differential sweep method as the most accurate method for measuring of magnetization. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2025, no. 4, pp. 42–48. doi: 10.17072/1994-3598-2025-4-42-48

Сведения об авторах

Александр Владимирович Лебедев, доктор физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, ул. Ак. Королева, 1, Пермь, 614013.

Author information

Aleksandr V. Lebedev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia.