

УДК 537.621.4 + 537.622.4 + 621.317.412

РЕАЛИЗАЦИЯ МАГНИТНО-РЕОЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ЧАСТИЦЫ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ЕЕ ИСКУССТВЕННОГО ЗАВИСАНИЯ

© 2024 г. Д. А. Сандуляк^{а,*}, А. А. Сандуляк^а, В. А. Ершова^а, А. В. Сандуляк^а,
М. Н. Полисмакова^а, А. С. Харин^а

^а МИРЭА — Российский технологический университет
Россия, 107076, Москва, ул. Строгинка 20
* e-mail: d.sandulyak@mail.ru

Поступила в редакцию 20.03.2024 г.

После доработки 27.05.2024 г.

Принята к публикации 28.06.2024 г.

Магнитометр с полюсами-полусферами позволяет, следуя новому магнитно-реологическому методу, определять магнитную восприимчивость χ одиночной частицы малых размеров (перемещающейся в столбе жидкости между полюсами-полусферами). Обосновывается, что возможности этого метода могут быть расширены за счет использования при выполнении экспериментов той части области между полюсами, которая находится ниже (а не изначально выше) их межцентровой линии. В этом случае, когда изучаемая частица принудительно перемещается вверх, что обусловливает снижение скорости и увеличение времени ее перемещения, можно целенаправленно замедлять такое перемещение (изменением намагничивающей силы магнитометра) вплоть до зависания частицы. Для случая такого зависания приводятся выражения (оказавшиеся облегченными), которые позволяют определять χ по значительно суженному кругу данных, необходимых для выполнения экспериментов и соответствующих расчетов.

DOI: 10.31857/S0032816224060122 EDN: EKNHCU

1. ВВЕДЕНИЕ

Определение магнитных свойств образцов малого объема (на уровне дисперсных частиц) является не только научной, но и актуальной практической задачей. Так, сведения о магнитной восприимчивости частиц особо востребованы в технологиях магнитной сепарации при очистке многих сред от разного рода ферромагнитных (ферримагнитных) примесей [1, 2], очистки сточных вод с применением магнитоактивных дисперсных сорбентов [3, 4], адресной доставки магнитовосприимчивых частиц (как активных носителей медицинского препарата) в биологии и медицине [5–7].

Из известных методов контроля магнитных свойств материалов [8, 9] для специфичной за-

дачи определения магнитных свойств образцов малого объема предпочтителен пондеромоторный метод [10–12], основанный на измерении магнитной силы F_m , действующей на образец, находящийся в неоднородном (градиентном) магнитном поле магнитометра. В работах [10, 13] найдены решения двух принципиальных вопросов, позволяющие развить этот метод магнитометрии. Во-первых, за счет применения полюсных наконечников сферической формы удалось добиться получения столь необходимой зоны (диагностируемой) постоянного магнитного силового фактора (представляющего собой произведение $B_{grad}B$, где B — индукция поля) для размещения в ней изучаемого малообъемного образца. Во-вторых, на основании исследований подвергаемых разрежению по-

рошкообразных образцов показано, что при уменьшении объемной доли магнитоактивных частиц в образце, когда достигается взаимное разобщение этих частиц, по найденным данным магнитной восприимчивости разреженного образца (с использованием измеряемой величины F_m) поддается оценке магнитная восприимчивость отдельной частицы.

Вместе с тем надо иметь в виду, что такой подход дает представление о магнитной восприимчивости среднестатистической частицы без информации о восприимчивости той или иной отдельно взятой частицы.

Метод, предназначенный для определения магнитной восприимчивости χ именно одиночной частицы, описывается в работах [14, 15]. Этот метод, именуемый магнитно-реологическим (МР) [14, 15], формально основывается на том же принципе, что и широко известный метод вискозиметрии, осуществляемый посредством естественной вертикальной седиментации шара в столбе жидкости. Получение здесь искомого результата, а именно динамической вязкости изучаемой жидкости, базируется на условии баланса действующих на шар трех постоянных сил: гравитационной F_g , силы Архимеда F_A и силы Стокса F_s .

Для получения МР-методом искомого результата, а именно значений χ для изучаемой частицы, эта частица, помещаемая в жидкость, дополнитель но подвергалась воздействию магнитной силы F_m , зависящей от χ , при соблюдении принципиальных требований: сила F_m обязательно должна быть постоянной по величине и, кроме того, строго ориентированной по направлению действия сил F_g , F_A и F_s [14, 15]. Это вполне обеспечивается применением в соответствующем магнитометре полюсов сферической формы. В таком случае частица будет совершать вертикальное принудительное перемещение в столбе жидкости, и при выполнении определенных условий [14, 15] справедливым останется условие баланса сил (здесь четырех), что позволяет получать в явном виде необходимые выражения для расчета χ .

При реализации МР-метода согласно работам [14, 15] осуществляется вертикальное перемещение изучаемой частицы в столбе жидкости вниз. В необходимом для определения магнитной восприимчивости χ изучаемой частицы условии баланса сил (в пределах исполнительной зоны,

расположенной в межполюсной области выше межцентровой линии полюсных наконечников) здесь такие силы, как гравитационная F_g и магнитная F_m , совпадают по направлению. В связи с этим изучаемая частица в исполнительной зоне (где магнитная сила выдерживается практически постоянной вследствие сохраняющегося почти постоянным магнитного силового фактора) [14, 15] перемещается сравнительно быстро, так как эта зона, к сожалению, вынужденно ограничена по протяженности h . Поэтому время такого перемещения частицы является весьма малым, его регистрация вызывает затруднения, что может негативно сказаться на точности измерений и, в конечном счете, на точности контроля данных χ . Следовательно, изучение возможности исключения такого, регистрируемого при реализации МР-метода, параметра, как время τ перемещения изучаемой частицы (что составило цель настоящей работы), позволило бы раскрыть новые возможности этой перспективной, на наш взгляд, методологии магнитометрии.

2. АРГУМЕНТАЦИЯ ПЕРЕХОДА К МР-МЕТОДУ С РАСШИРЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ

Возможности МР-метода (при реализации которого целенаправленно используется электромагнитная система с полюсными наконечниками сферической формы [14, 15]) позволяют несложно уменьшать скорость вертикального перемещения изучаемой частицы (в том числе в пределах исполнительной зоны протяженностью h) и, значит, увеличивать время этого перемещения, принимая во внимание следующее. Когда применяются полюсные наконечники сферической формы, координатная характеристика магнитного силового фактора $B_{grad}B$ в любом из радиальных направлений плоскости симметрии межполюсной области имеет экстремальный вид [10, 11]. Следовательно, зона в окрестности экстремума, где значения этого фактора практически постоянны, являясь исполнительной зоной, содержится по вертикали как выше, так и симметрично ниже межцентровой линии полюсных наконечников. Поэтому для желательного снижения скорости перемещения изучаемой частицы и увеличения за счет этого времени τ ее перемещения (в пределах исполнительной зоны протяженностью h) при реализации МР-метода можно исполь-

зователь также нижнюю исполнительную зону (рис. 1) [16]. Здесь сила тяжести F_g , направленная вниз, и магнитная сила F_m , направленная вверх, противодействуют друг другу, что обусловит не только изменение направления перемещения изучаемой частицы, но и существенное уменьшение скорости и увеличение времени τ ее перемещения.

Тем самым при такой, как бы обратной, седиментации обеспечивается замедленное (по сравнению с реализацией МР-метода в работах [14, 15], когда F_g и F_m — однородны) перемещение изучаемой частицы (вверх, в пределах такой же вынуждено ограниченной величины h). При соблюдении указанных в работах [14, 15] требований магнитную восприимчивость частицы χ можно определять исходя из справедливого здесь [16] (скорректированного по сравнению с работами [14, 15]) условия баланса сил (рис. 1): $F_g - F_m + F_A - F_S = 0$, а именно гравитационной силы $F_g = \pi\delta^3\rho g/6 = \rho Vg$, силы Архимеда $F_A = \pi\delta^3\rho_\eta g/6 = \rho_\eta Vg$, силы Стокса $F_S = 3k\pi\delta\eta v = 3k\pi\delta\eta h/\tau$ (при соблюдении ламинарного режима, т.е. при малых числах Рейнольдса, когда $Re = \eta\delta\rho/\eta < 2$ [17], скорость частицы v в жидкости постоянная при установившемся режиме движения частицы в пределах ее перемещения h по высоте столба жидкости), а также магнитной силы

$F_m = \mu_0\chi VH\text{grad}H = \chi VB\text{grad}B/\mu_0$. Здесь η и ρ_η — динамическая вязкость и плотность используемой жидкости; δ , ρ , V — соответственно эквивалентный диаметр частицы (уподобляемой модельной шарообразной), ее плотность и объем; $k = 1/\phi$ — коэффициент, учитывающий отличие формы изучаемой частицы от модельной сферической (ϕ — отношение скоростей седиментации частицы и модельной сферической частицы, по данным работы [17] $\phi = 0.66...0.77$ для разных несферических частиц: угловатых и округлой формы), g — ускорение свободного падения (9.81 м/с^2), B — индукция поля в точке местоположения частицы, μ_0 — магнитная константа ($4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$). Тогда из оговоренного условия баланса сил последует выражение для определения магнитной восприимчивости χ частицы (совершающей замедленное вертикальное перемещение вверх) [16].

Как следует из простого упоминания параметров, значениями которых необходимо располагать для реализации МР-метода (при определении магнитной восприимчивости χ изучаемой частицы) [14–16], их количество значительно — около десятка. Между тем, информацию о χ можно получить, используя данные менее половины из них, используя еще одну из доступных возможностей МР-метода.

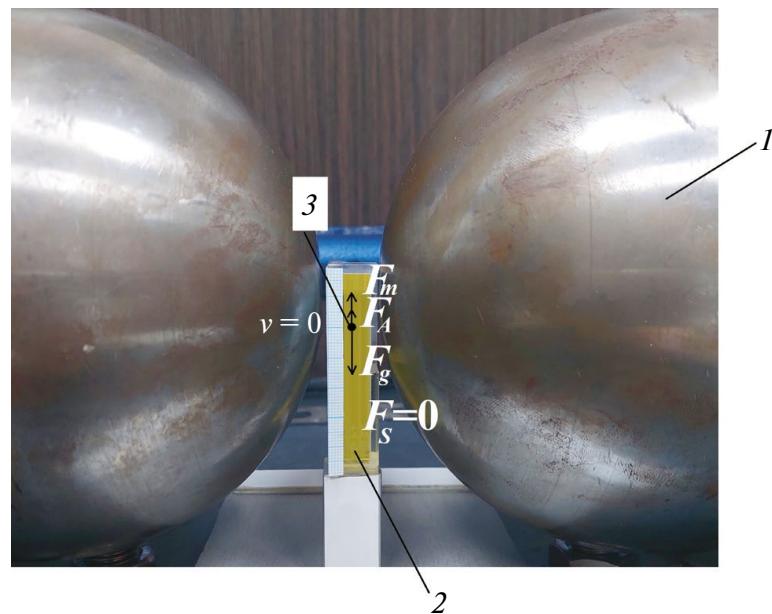


Рис. 1. Иллюстрация магнитно-реологического метода контроля магнитной восприимчивости одиночной частицы с обеспечением ее искусственного зависания: 1 — полюсные наконечники (сферической формы) электромагнитной системы магнитометра, 2 — столб жидкости, в которой осуществляется перемещение изучаемой частицы 3 с последующим зависанием ($v = 0$) в точке с определенным значением магнитного силового фактора.

Для этого опыт по вертикальному перемещению изучаемой частицы 3 вверх в столбе жидкости 2 следует осуществлять в режиме магнитного управления, изменяя магнитные параметры (такие как индукция B и, соответственно, градиент $\text{grad}B$) изменением намагничивающей силы электромагнитной системы магнитометра 1 (рис. 1) [18]. При этом следует осуществлять варьирование токовой нагрузки (непосредственно при проведении опыта), вызывая сначала перемещение изучаемой частицы 3 вверх, а затем торможение в перемещении частицы вплоть до ее зависания: когда скорость перемещения v частицы станет равняться нулю (рис. 1). Тем самым в состоянии зависания частицы сила Стокса исчезает ($F_s = 0$) и составляемое ключевое условие баланса действующих на частицу сил записывается здесь без этой силы:

$$F_g - F_A - F_m = 0. \quad (1)$$

Тогда искомая магнитная восприимчивость χ изучаемой частицы определяется исходя из этого — суженного — условия (по сравнению с записанным выше), т.е. без фигурирующей в нем силы F_s , с помощью записанных выше выражений для F_g , F_A и F_m :

$$\chi = g(\rho - \rho_\eta) \mu_0 / B \text{grad}B, \quad (2)$$

что исключает необходимость трудоемкого определения динамической вязкости η жидкости и эквивалентного диаметра δ частицы. При этом из устанавливаемой координатной характеристики B , а также из получаемой на ее основе координатной характеристики $\text{grad}B$ определяются значения этих параметров в точке зависания частицы.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возможности предложенного нового метода определения магнитной восприимчивости χ такого специфичного ферромагнетика (ферримагнетика), как одиночная частица малых размеров, рассматриваются на основании анализа конкуренции сил, в том числе магнитной (зависящей от χ), действующих на изучаемую частицу, перемещающуюся по вертикали в сосуде с жидкостью, помещенном между полюсами электромагнитной системы соответствующего

магнитометра. Мы обращаем внимание на то, что в случае применения полюсов-полусфер эти возможности могут быть расширены за счет использования при выполнении экспериментов той части межполюсной области, которая находится ниже (а не изначально выше) межцентровой линии полюсов. В этом случае, когда обеспечивается перемещение (принудительное) изучаемой частицы вверх, что обусловливает снижение скорости и увеличение времени перемещения частицы, можно также подконтрольно замедлять ее перемещение (изменением намагничивающей силы магнитометра) вплоть до зависания. Для случая зависания частицы приводятся выражения (оказавшиеся облегченными по числу фигурирующих в них параметров), которые позволяют определять χ по значитель- но суженному кругу данных, получаемых при выполнении экспериментов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках госзаказания в сфере науки (проект № FSFZ-2024-0005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ku J., Lei Z., Lin H., Yan Q., Chen H., Guo B.* // International J. of Mining Science and Technology. 2022. V. 32 (6). P. 1341. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2022.08.007>
2. *Cooper R.P., Doyle J.F., Dunn D.S., Vellinger J.C., Todd P.W.* // Separation Science and Technology. 2004. V. 39 (12). P. 2809. <https://doi.org/10.1081/SS-200028762>
3. *Feng Z., Chen H., Li H., Yuan R., Wang F., Chen Z., Zhou B.* // Science of the Total Environment. 2020. V. 713. P. 136423. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136423>
4. *Bagheri A.R., Ghaed M., Asfaram A., Bazrafshan A.A., Jannesar R.* // Ultrasonics Sonochemistry. 2017. V. 34. P. 294. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2016.05.047>
5. *Орлов В.А., Прокопенко В.С., Руденко Р.Ю., Орлова И.Н.* // Физика металлов и металловедение. 2020. Т. 121. № 11. С. 1135. <https://doi.org/10.31857/S0015323020100071>
6. *Vitol E.A., Novosad V., Rozhkova E.A.* // Nanomedicine. 2012. V. 7 (10). P. 1611. <https://doi.org/10.2217/nnm.12.133>
7. *Cardoso V.F., Francesko A., Ribeiro C., Bañobre-López M., Martins P., Lanceros-Mendez S.* // Adv. Healthcare Mater. 2018. V. 7. P.1700845. <https://doi.org/10.1002/adhm.201700845>

8. *Riminucci A., Uhlarz M., De Santis R., Herrmannsdörfer T.* // *J. of Applied Physics.* 2017. V. 121. P. 094701.
<https://doi.org/10.1063/1.4977719>
9. *Slobinsky D., Borzi R.A., Mackenzie A.P., Grigera S.A.* // *Review of Scientific Instruments.* 2012. V. 83. P. 125104.
<https://doi.org/10.1063/1.4769049>
10. *Сандуляк А.А., Сандуляк А.В., Полисмакова М.Н., Киселев Д.О., Ершова В.А., Сандуляк Д.А.* // *ПТЭ.* 2018. № 1. С. 109.
<https://doi.org/10.7868/S0032816218010342>
11. *Сандуляк А.А., Сандуляк Д.А., Полисмакова М.Н., Ершова В.А., Сандуляк А.В.* // *ПТЭ.* 2023. № 4. С. 116.
<https://doi.org/10.1134/S0020441223030107>
12. *Казин П.Е., Кульбакин И.В.* Методы исследования магнитных свойств материалов. М.: МГУ. 2011.
13. *Sandulyak A.V., Sandulyak A.A., Ershova V.A., Sandulyak D.A., Polismakova M.N., Kiselev D.O.* // *J. of Engineering Physics and Thermophysics.* 2020. V. 93. P. 210.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10891-020-02110-x>
14. *Сандуляк А.А., Сандуляк Д.А., Полисмакова М.Н., Сандуляк А.В., Ершова В.А., Киселев Д.О.* // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика.* 2023. № 5. С. 1.
<https://doi.org/10.25791/pribor.11.2023.1450>
15. *Сандуляк А.А., Сандуляк А.В., Ершова В.А., Сандуляк Д.А.* РФ Патент 2753159, 2021.
16. *Сандуляк А.А., Сандуляк Д.А., Полисмакова М.Н., Сандуляк А.В., Харин А.С., Соловьев И.А.* РФ Патент 2805765, 2023.
17. *Касаткин А.Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1973.
18. *Сандуляк Д.А., Сандуляк А.А., Ершова В.А., Сандуляк А.В., Полисмакова М.Н.* РФ Патент 2813499, 2024.