

**ВАРИАНТЫ МАГНИТНО-РЕОЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ  
МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ОДИНОЧНОЙ ЧАСТИЦЫ****Д. А. Сандуляк***МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия  
d.sandulyak@mail.ru*

**Аннотация.** Рассматриваются особенности и варианты предложенного метода определения магнитной восприимчивости  $\chi$  такого специфичного ферро(ферри)магнетика, как одиночная частица малых размеров. Метод базируется на анализе конкуренции сил, в том числе магнитной, зависимой от  $\chi$ , действующих на исследуемую частицу, перемещающуюся по вертикали в столбе покоящейся жидкости. Сформулированы требования к реализации магнитно-реологического метода (МР-метода), исполнение которых позволит обоснованно свести в общем случае трехмерную задачу определения  $\chi$  к результативной одномерной, причем к вполне приемлемому для достижения решения уравнению баланса сил. Рассматриваются три варианта МР-метода: с перемещением частицы вниз, с ее перемещением вверх и с управляемым перемещением вверх до состояния зависания. Приведены соответствующие выражения для определения  $\chi$  по данным, получаемым при выполнении опытов.

*Ключевые слова:* магнитно-реологический метод, одиночная частица, магнитная восприимчивость, неоднородное поле, магнитный силовой фактор

**Благодарности:** исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках госзадания в сфере науки (проект FSFZ-2024-0005).

**Ссылка для цитирования:** Сандуляк Д. А. Варианты магнитно-реологического метода контроля магнитной восприимчивости одиночной частицы // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 7. С. 599–608. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-599-608.

**VARIANTS OF MAGNETIC-RHEOLOGICAL METHOD  
FOR MONITORING THE MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF A SINGLE PARTICLE****D. A. Sandulyak***MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russia  
d.sandulyak@mail.ru*

**Abstract.** Features and variants of the proposed new method for determining magnetic susceptibility  $\chi$  such a specific ferro (ferry) magnetic as a single particle of small size are described — on the basis of an analysis of the competition of forces, including magnetic force (dependent on  $\chi$ ), acting on the studied particle moving vertically in a column of resting liquid. It is stated that the fulfillment of the formed requirements for the implementation of the magneto-rheological method (MR-method) will allow to reasonably reduce in the general case the three-dimensional problem of determining  $\chi$  to a productive one-dimensional one, and to a force balance equation that is quite acceptable for achieving a solution. Three variants of the MR-method are considered: with the movement (forced sedimentation) of the particle down, with its movement up and with the controlled movement of the particle up to the state of its hanging. The corresponding expressions for determining  $\chi$  from data obtained during experiments are given.

*Keywords:* magnetic-rheological method, single particle, magnetic susceptibility, inhomogeneity magnetic field, magnetic force factor

**Acknowledgments:** the research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FSFZ-2024-0005).

**For citation:** Sandulyak D. A. Variants of magnetic-rheological method for determining the magnetic susceptibility of a single particle. Journal of Instrument Engineering. 2024. Vol. 67, N 7. P. 599–608 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-599-608.

**Введение.** Вопрос контроля магнитных свойств такого ферро(ферри)магнетика, как одиночная частица малых размеров, долгое время остается открытым. Это сдерживает развитие промышленных, природоохраных, медико-биологических технологий, связанных с магнитным воздействием на дисперсные среды, которые содержат фракцию магнитоактивных частиц, например, при магнитном разделении (сепарации), магнитофорезе.

В [1] описывается активно разрабатываемый метод контроля, когда по данным экспериментально получаемой и анализируемой концентрационной зависимости магнитной восприимчивости дисперсного (порошкового, разреженного — при разобщенных частицах) образца можно определять магнитную восприимчивость  $\chi$  отдельной частицы [1–4].

В дополнение к этому оригинальному методу, позволяющему судить о восприимчивости среднестатистической частицы, без детализации данных  $\chi$  для той или иной частицы, в [5, 6] рассматривается ранее в отечественной и зарубежной практике не применявшийся метод определения  $\chi$  одиночной, т. е. отдельно взятой, частицы путем осуществления принудительной, усиливаемой воздействием специально создаваемого неоднородного магнитного поля, вертикальной седиментации исследуемой частицы в столбе жидкости. В отличие от известного, формально родственного по принципу седиментации метода вискозиметрии, где результат — определение динамической вязкости жидкости — следует из баланса действующих на частицу сил, в данном методе [5, 6] за счет появления дополнительно магнитной силы, зависящей от параметра  $\chi$ , именно этот параметр выступает в качестве искомого.

Такой метод, названный магнитно-реологическим (МР-метод) [5, 6], при определенном образом организованном магнитном силовом воздействии может быть представлен несколькими, обладающими индивидуальными особенностями вариантами его исполнения.

**Базовые положения и варианты МР-метода. Принцип вискозиметрии как предпосылка к МР-методу.** В основе подхода к разработке МР-метода контроля магнитной восприимчивости  $\chi$  одиночной частицы лежит ряд физических представлений, технико-метрологических и процедурных решений, присущих одному из широко известных подходов к методу определения динамической вязкости  $\eta$  жидкости [5, 6]. Так, напомним, этот подход сводится к седиментации шара диаметром  $\delta$  и плотностью  $\rho$  в столбе покоящейся жидкости плотностью  $\rho_\eta$  с регистрацией времени  $\tau$  вертикального фиксируемого перемещения  $h$  шара при установившемся режиме седиментации. Силе тяжести шара  $F_g = \pi\delta^3\rho g/6$  противодействуют две силы: сила Архимеда  $F_A = \pi\delta^3\rho_\eta g/6$  и сила Стокса  $F_S = 3\pi\delta\eta v = 3\pi\delta\eta h/\tau$  при соблюдении ламинарного режима, т. е. при малых числах Рейнольдса, когда  $Re = v\delta\rho_\eta/\eta < 2$  [7],  $v$  — постоянная скорость шара в жидкости. Исходя из справедливого условия баланса этих трех сил, действующих по одной и той же вертикали, постоянных по величине, ответственных за равномерное движение шара в жидкости (в этом случае инерционная сила отсутствует, иначе это потребовало бы составления и решения дифференциального уравнения динамики):

$$F_g - F_A - F_S = 0, \quad (1)$$

нетрудно получить известную формулу для определения  $\eta$ , а именно:  $\eta = \delta^2 g(\rho - \rho_\eta)\tau/18h$ .

Когда форма тела (частицы) отличается от модельной сферической и характеризуется эквивалентным диаметром  $\delta$ , что для частицы может оцениваться, в частности, по данным микроскопии, в выражение для силы Стокса следует ввести поправочный коэффициент  $k > 1$ . Будучи величиной, обратной так называемому коэффициенту формы  $\phi$  для разных частиц, т. е.  $k = 1/\phi$ , где  $\phi = 0,66...0,77$  — отношение скоростей осаждения несферической и сферической частиц [7], оценочно  $k \cong 1,4$ . Следовательно, в этом, более общем, случае  $\eta = \delta^2 g(\rho - \rho_\eta)\tau/18kh$ .

Нелишне при этом отметить, что в случае когда вязкость  $\eta$  используемой в опытах жидкости известна, это выражение для  $\eta$  может послужить решению обратных, в данном случае сопутствующих, задач, т. е. получению сведений о других, фигурирующих в этом выражении параметрах. В частности, это касается кажущегося проблемного определения значения плотности  $\rho$  изучаемого тела (частицы), например, в отсутствие соответствующей информации об элементном составе как  $\rho = \rho_\eta + 18k\eta h/\delta^2 g\tau$ .

**Требования к реализации магнитного силового воздействия в МР-методе.** Когда сферическая или несферическая частица, перемещающаяся в жидкости, дополнительно к указанным в (1) силам подвергается еще и воздействию магнитной (пондеромоторной) силы  $F_m$ , вызванной влиянием на нее неоднородного магнитного поля, это так или иначе отражается на ее перемещении. К факторам, от которых зависят изменения в перемещении частицы, относятся ее магнитные свойства, а значит, их можно в принципе установить, фиксируя эти изменения.

Что касается величины магнитной силы, действующей в неоднородном магнитном поле на одиночную малую частицу объемом  $V$ , то она выражается как [8–15]  $F_m = \mu_0 \chi V H \text{grad} H$  или  $F_m = \chi V B \text{grad} B / \mu_0$ , причем магнитная восприимчивость  $\chi$  частицы соответствует значению напряженности  $H$  или, что то же самое, индукции  $B = \mu_0 H$  поля в „точке“ местоположения частицы, с учетом того, что при вынужденном перемещении частицы в неоднородном поле значения  $H$  и  $B$  изменяются; здесь  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная константа.

В общем случае осуществления принудительной седиментации исследуемой частицы, т.е. при произвольном магнитном силовом воздействии, а не специально организованном по направлению и характеру изменения, задача о параметрах перемещения частицы становится трехмерной: необходимо прибегать к составлению системы дифференциальных уравнений динамики движения частицы и последующим попыткам ее решения. Это в существенной мере усложняет получение ожидаемых результатов.

Говорить же о возможности исходить из удобного условия баланса сил, здесь четырех, по примеру условия (1) следует лишь после обоснованной организации магнитной силы применительно к ключевой цели получения информации о магнитных свойствах частицы. Так, эта возможность появится, когда удастся, во-первых, ориентировать магнитную силу  $F_m$  вдоль линии действия характерных для обычной седиментации сил, фигурирующих в (1) — гравитационной  $F_g$ , Архимеда  $F_A$ , Стокса  $F_S$ , и, во-вторых, сохранить силу  $F_m$  постоянной в пределах ограниченного, специально фиксируемого, перемещения  $h$  исследуемой частицы. Только такой подход к организации магнитной силы, которая должна воздействовать на исследуемую частицу, позволит упростить задачу до одномерной и избежать проявления инерционных сил.

Отсюда и два соответствующих принципиальных требования именно к осуществлению принудительной седиментации исследуемой частицы для реализации МР-метода [5, 6], когда можно обоснованно воспользоваться условием баланса сил наподобие условия (1) в расширенном (с учетом силы  $F_m$ ) варианте.

Выполнение этих требований не вызывает затруднений, если для создания неоднородного магнитного поля, воздействующего на исследуемую частицу, использовать магнитометр с оригинальной электромагнитной системой (рис. 1): в ней магнитопровод  $1$ , на котором расположена обмотка  $2$ , имеет полюсные наконечники  $3$  сферической формы [16]. При реализации МР-метода сосуд с жидкостью  $4$ , где осуществляется перемещение исследуемой частицы  $5$  (затемненная точка), размещается посередине между полюсами-полусферами перпендикулярно межцентровой линии полюсов. В этом случае магнитная сила  $F_m$ , которая действует в плоскости симметрии межполюсной области, направлена к центру симметрии по одной и той же, как и силы  $F_g$ ,  $F_A$ ,  $F_S$ , вертикальной линии. К тому же такие полюсные наконечники (рис. 1) обеспечивают получение магнитной силы  $F_m$ , которая в определенной зоне создаваемого неоднородного поля характеризуется практически постоянными значениями. Это обусловлено тем, что получаемая координатная характеристика индукции  $B$  в направлении  $x$  между полюсами-полусферами действия магнитной силы (т.е. зависимость  $B$  от  $x$ ) имеет примечательный перегиб [16], а значит, координатная характеристика градиента  $\text{grad} B \cong dB/dx$  (или  $\text{grad} H \cong dH/dx$ ) приобретает экстремальный вид. Более того, экстремальный вид приобретает и координатная характеристика фигурирующего в выражении для  $F_m$  магнитного силового фактора  $B \text{grad} B$  (или  $H \text{grad} H$ ), причем известными становятся как местоположение, так и пределы исполнительной зоны его практического постоянства — в окрестности экстремума [17]. Эти соответственно маркируемые пределы (верхний  $6$  и нижний  $7$  на рис. 1,  $a$ , которые удобно помечать световыми маркерами

на стенке сосуда — от лучей, испускаемых лазерными модулями [1]), становятся пределами фиксируемого перемещения  $h$  исследуемой частицы 5 в столбе жидкости 4.

Следовательно, выполняя оговоренные требования к реализации МР-метода — с осуществлением принудительной седиментации исследуемой частицы 5 по вертикали, действительно можно основываться на условии баланса сил, а именно  $F_g$ ,  $F_A$ ,  $F_S$  и  $F_m$ . При этом наряду с соблюдением постоянства  $F_m$ , которое достигается в пределах перемещения  $h$  частицы, перепад значений напряженности поля  $H$  в этих же пределах настолько минимизирован, что это позволяет оперировать усредненным значением  $H$  и вполне соответствующим ему тем или иным значением  $\chi$ .

**Вариант МР-метода с принудительной седиментацией частицы (рис. 1, а).** В представленном на рис. 1, а варианте МР-метода [5, 6], когда исполнительная зона, в пределах которой фиксируется перемещение  $h$  частицы, расположена выше межцентральной линии полюсов-полусфер, магнитная сила  $F_m$ , направленная вертикально вниз, способствует гравитационной силе  $F_g$ , тем самым ускоряя седиментацию. При соблюдении указанных выше требований условие баланса сил, действующих на исследуемую частицу при ее принудительной седиментации, может быть записано в расширенном по сравнению с (1) виде:

$$F_g - F_A - F_S + F_m = 0. \quad (2)$$

Из этого условия, используя приведенные выше выражения для  $F_g$ ,  $F_A$ ,  $F_S$ ,  $F_m$ , нетрудно получить выражения (взаимно эквивалентные) для определения магнитной восприимчивости  $\chi$  частицы:

$$\chi = \frac{18k \frac{\eta h}{\delta^2 \tau} - g(\rho - \rho_\eta)}{\mu_0 H \text{grad} H} \quad \text{или} \quad \chi = \frac{18k \frac{\eta h}{\delta^2 \tau} - g(\rho - \rho_\eta)}{B \text{grad} B} \mu_0. \quad (3)$$

Здесь  $\tau$  — измеряемое в эксперименте время перемещения частицы в жидкости вниз в пределах исполнительной зоны.

То или иное из выражений (3) используется в зависимости от выбора параметра поля —  $H$  или  $B$  — при уже известных или дополнительно выясненных значениях  $\eta$ ,  $\rho_\eta$ ,  $\delta$ ,  $\rho$ ,  $B \text{grad} B$  (или  $H \text{grad} H$ ).

**Вариант МР-метода с принудительным перемещением частицы вверх (рис. 1, б).** В рассмотренном варианте МР-метода (см. рис. 1, а) осуществляется вертикальное перемещение исследуемой частицы в столбе жидкости вниз в пределах исполнительной зоны, расположенной выше межцентральной линии полюсных наконечников. В этом случае в условии баланса сил гравитационная  $F_g$  и магнитная  $F_m$  силы совпадают по направлению, и исследуемая частица в исполнительной зоне (вынужденно ограниченной по размерам) перемещается сравнительно быстро. Как следствие, время  $\tau$  такого перемещения частицы весьма мало, что обуславливает затруднения при его регистрации и негативно влияет на ее точность, а значит, на точность контроля  $\chi$ .

Что касается желаемого увеличения времени  $\tau$  перемещения исследуемой частицы, то это можно легко осуществить простой перекомпоновкой ответственных элементов магнитометра. Для этого необходимо принять во внимание следующее. Координатная характеристика магнитного силового фактора применяемых полюсных наконечников сферической формы, т. е.  $B \text{grad} B$  (или  $H \text{grad} H$ ), в любом из радиальных направлений плоскости симметрии межполюсной области одинакова, причем она имеет, как сказано выше, экстремальный вид. Это говорит о том, что в окрестности экстремума значения этого фактора практически постоянны, и исполнительная зона имеется между полюсными наконечниками по вертикали как выше, так и ниже их межцентральной линии.

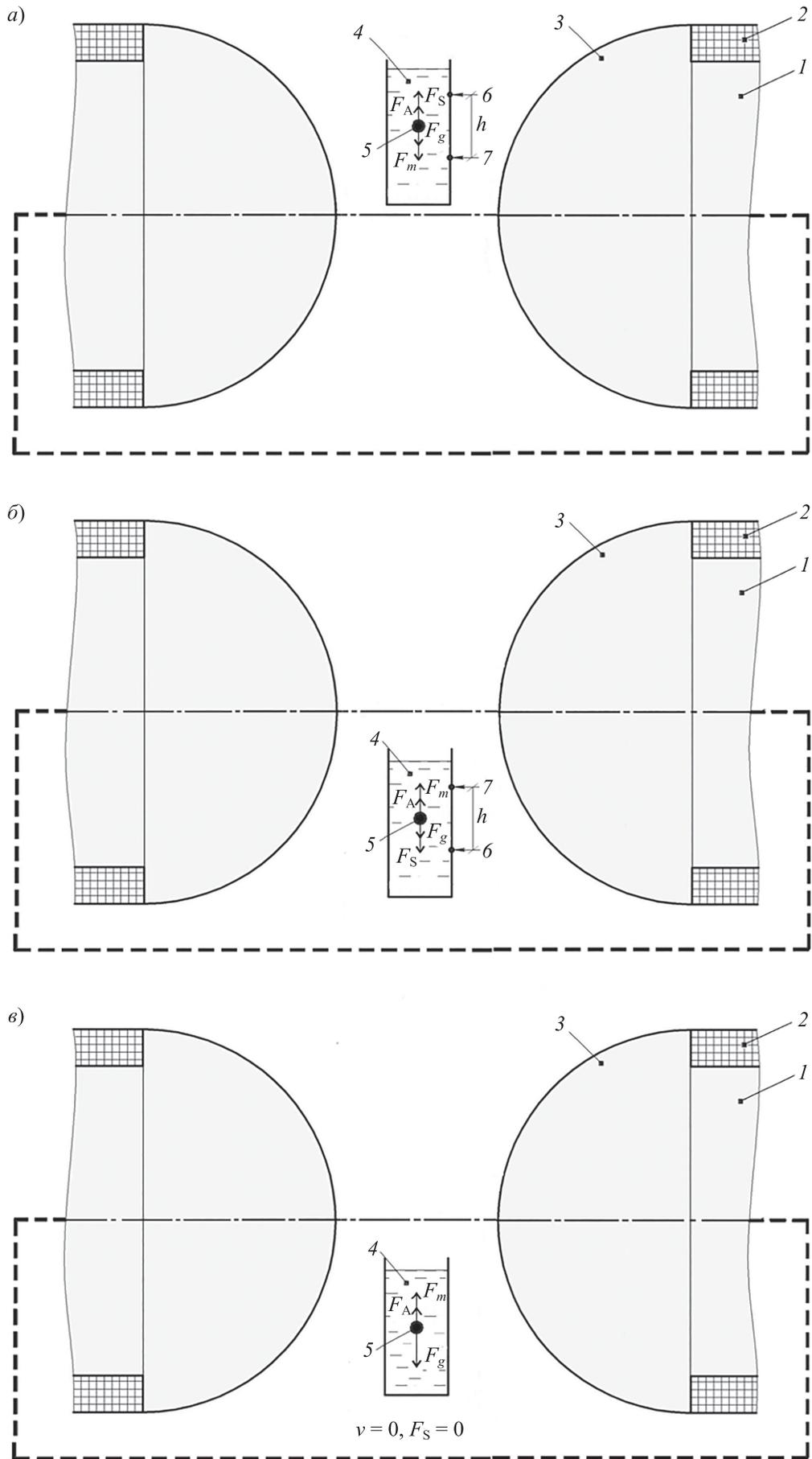


Рис. 1

Таким образом, при реализации МР-метода может быть использована также нижняя исполнительная зона (см. рис. 1, б) [18]. В ней сила тяжести  $F_g$  направлена вниз, а магнитная сила  $F_m$  направлена вверх, противодействуя друг другу. Из-за этого не только изменится направление перемещения исследуемой частицы, но и уменьшится скорость ее перемещения, таким образом будет обеспечиваться замедленное по сравнению с предыдущим вариантом МР-метода, когда  $F_g$  и  $F_m$  имеют одно направление, перемещение исследуемой частицы. Она перемещается вверх, в том числе в пределах такой же вынужденно ограниченной величины  $h$ . Исходя из справедливого для этого варианта условия баланса сил

$$F_g - F_A + F_S - F_m = 0, \quad (4)$$

соблюдая указанные выше требования и используя приведенные выше выражения для  $F_g$ ,  $F_A$ ,  $F_S$ ,  $F_m$ , можно получить взаимно эквивалентные выражения для определения магнитной восприимчивости  $\chi$  частицы, совершающей, напомним, замедленное вертикальное перемещение вверх [18]:

$$\chi = \frac{\frac{18k\eta h}{\delta^2\tau} + g(\rho - \rho_\eta)}{\mu_0 H \text{grad} H} \quad \text{или} \quad \chi = \frac{\frac{18k\eta h}{\delta^2\tau} + g(\rho - \rho_\eta)}{B \text{grad} B} \mu_0. \quad (5)$$

Входящие в эти выражения параметры соответствуют принятым ранее, с учетом того, что здесь параметр  $\tau$  — это измеряемое в эксперименте время перемещения частицы в жидкости вверх от нижнего  $b$  до верхнего  $7$  предела исполнительной зоны протяженностью  $h$ , расположенной ниже межцентральной линии полюсов-полусфер.

Подобно предыдущему варианту то или иное из выражений (5) используется в зависимости от выбора параметра поля —  $H$  или  $B$  — и при уже известных или дополнительно выясненных значениях  $\eta$ ,  $\rho_\eta$ ,  $\delta$ ,  $\rho$ ,  $B \text{grad} B$  (или  $H \text{grad} H$ ).

**Вариант МР-метода с зависанием частицы (рис. 1, в).** Для реализации предшествующих вариантов МР-метода по определению магнитной восприимчивости  $\chi$  исследуемой частицы (см. рис. 1, а, б) [5, 6, 18] необходимо располагать данными, получаемыми в основном опытным путем, о значительном количестве параметров — около десяти. Между тем информацию о  $\chi$  можно получить, используя менее половины из этих параметров, выполняя опыты несколько по-иному [19].

Соответствующий вариант МР-метода (см. рис. 1, в) предусматривает проведение опыта по магнитоуправляемому вертикальному перемещению частицы вверх в столбе жидкости, как в предшествующем варианте метода (см. рис. 1, б) [18]. Это перемещение осуществляется, что уже оговорено, при действии на исследуемую частицу сил тяжести  $F_g$ , Архимеда  $F_A$ , Стокса  $F_S$ , а также магнитной силы  $F_m$ , создаваемой неоднородным магнитным полем с координатными (согласно координатам перемещения частицы) характеристиками таких магнитных параметров поля, как напряженность  $H$  и/или индукция  $B$ , градиент  $\text{grad} H$  и/или  $\text{grad} B$ . Применяемые для получения этого поля полюсные наконечники электромагнитной системы, обеспечивающей возможность изменения магнитных параметров ее токовой нагрузкой, располагают, как и ранее, по обе стороны столба жидкости. Для проведения опыта используется зона, расположенная ниже межцентральной линии полюсных наконечников: в этой зоне, напомним, сила тяжести, направленная вниз, и магнитная сила, направленная вверх, противодействуют друг другу, обуславливая возможность замедленного перемещения исследуемой частицы вверх.

При проведении опыта следует варьировать токовую нагрузку электромагнитной системы, вызывая сначала перемещение исследуемой частицы вверх, а затем торможение в перемещении вплоть до зависания частицы, когда скорость перемещения составит  $v = 0$  [19]. Тем самым в состоянии зависания сила Стокса исчезает ( $F_S = 0$ ) и ключевое условие баланса действующих на частицу сил примет следующий вид:

$$F_g - F_A - F_m = 0. \quad (6)$$

Тогда искомая магнитная восприимчивость  $\chi$  исследуемой частицы определяется по любому из двух взаимно эквивалентных выражений

$$\chi = \frac{g(\rho - \rho_{\eta})}{\mu_0 H \text{grad} H} \text{ или } \chi = \frac{g(\rho - \rho_{\eta})}{B \text{grad} B} \mu_0, \quad (7)$$

в зависимости от того, какой из параметров выбран для проведения опытов: напряженность  $H$  или индукция  $B = \mu_0 H$ . При этом на основе устанавливаемых координатных характеристик параметров  $H$  и/или  $B$ , а также соответствующих координатных характеристик параметров  $\text{grad}H$  и/или  $\text{grad}B$  используют значения этих параметров в точке зависания частицы.

#### Результаты реализации МР-метода контроля магнитной восприимчивости одиночных частиц.

На рис. 2 и 3 показаны полученные по результатам экспериментов данные магнитной восприимчивости  $\chi$  частиц-примесей, выделенных из проб кварцевого песка и полевого шпата (сырьевых компонентов продукции из стекла и керамики). Количество исследуемых частиц ( $N$ ) в обоих случаях составляло 24 и 22. В исполнительной зоне межполюсного пространства магнитометра (полюса-полусферы диаметром 185 мм) среднее значение напряженности поля составляло  $H = 80$  кА/м. В качестве жидкости, в которой осуществлялось принудительное перемещение исследуемых частиц, использовалось высоковязкое моторное масло.

Полученные данные  $\chi$  представлены в виде показательных гистограмм распределения, где ось ординат — относительное количество частиц  $N_i/N$ , попавших в тот или иной интервал восприимчивости  $\chi$ . Видно, что при характерных значениях магнитной восприимчивости феррочастиц песка, достигающих  $\chi = 0,8$ , преобладают частицы восприимчивостью  $\chi \leq 0,1$  (рис. 2), а при значениях  $\chi$  для феррочастиц шпата, достигающих 0,5, подавляющее число таких примесей обладают восприимчивостью  $\chi \leq 0,04$  (рис. 3).

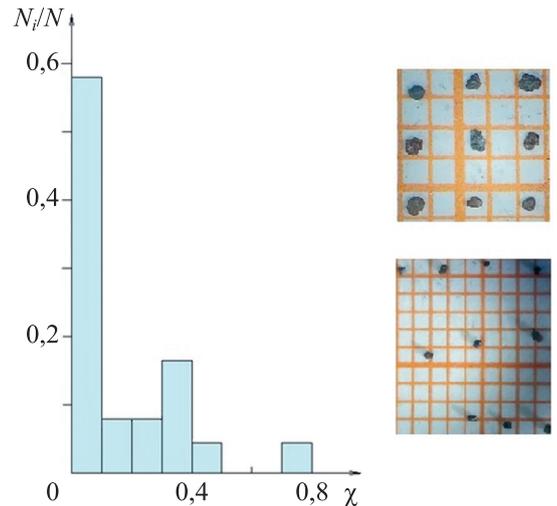


Рис. 2

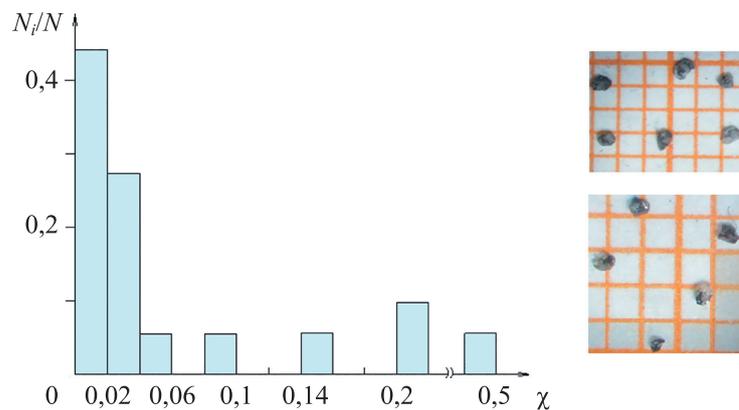


Рис. 3

**Заключение.** Рассмотрены особенности и варианты предложенного нового метода определения магнитной восприимчивости  $\chi$  такого специфичного ферро(ферри)магнетика, как одиночная частица малых размеров, на основании анализа конкуренции сил, в том числе магнитной, зависимой от  $\chi$ , действующих на исследуемую частицу, перемещающуюся по вертикали в столбе

покоящейся жидкости. Представленный магнитно-реологический метод, предпосылкой которого является один из методов вискозиметрии, реализуется при обязательно определенным образом организованном магнитном силовом воздействии на частицу. Так, магнитную силу необходимо, во-первых, ориентировать строго вдоль вертикальной линии действия сил, характерных для обычной седиментации, и, во-вторых, выдерживать постоянной в пределах ограниченной исполнительской зоны, регистрируя время перемещения в ней исследуемой частицы.

Выполнение этих, достаточно жестких, требований возможно, если для создания неоднородного поля, действующего на исследуемую частицу, использовать опробованную оригинальную электромагнитную систему — с полюсными наконечниками сферической формы, между которыми следует помещать сосуд с жидкостью, где происходит принудительное перемещение исследуемой частицы. Тогда характерная для общего случая магнитного силового воздействия сложная трехмерная задача, обязывающая составлять и решать систему дифференциальных уравнений динамики движения частицы, сводится к одномерной задаче, причем к вполне приемлемому для решения уравнению баланса сил, избегая проявления инерционной силы.

Рассмотрены три варианта МР-метода. В первом из них регистрируется время перемещения исследуемой частицы вниз в пределах исполнительской зоны, находящейся выше межцентральной линии полюсов. Так как в этом случае гравитационная и магнитная силы совпадают по направлению, частица перемещается сравнительно быстро, время ее перемещения весьма мало, его регистрация вызывает затруднения. Во втором варианте МР-метода имеется возможность увеличить время перемещения исследуемой частицы в пределах исполнительской зоны. В этом случае задействуется исполнительская зона, находящаяся ниже межцентральной линии полюсов, гравитационная и магнитная силы противодействуют друг другу, что обуславливает не только изменение направления перемещения исследуемой частицы (здесь вверх), но и уменьшение скорости ее перемещения. В третьем варианте МР-метода благодаря управлению перемещением исследуемой частицы в нижней исполнительской зоне вверх путем варьирования токовой нагрузки электромагнитной системы достигается торможение в перемещении частицы вплоть до ее зависания, тогда регистрируемыми становятся магнитные параметры поля в координате точки зависания частицы. При этом за счет исключения силы Стокса из условия баланса действующих на частицу сил количество параметров, используемых для определения магнитной восприимчивости исследуемой частицы, сокращается практически наполовину.

Для всех трех вариантов МР-метода приведены выражения, позволяющие по опытным данным определять значения магнитной восприимчивости исследуемой частицы, а также экспериментальные данные  $\chi$  (при напряженности поля  $H = 80$  кА/м) для феррочастиц-примесей, выделенных из таких сырьевых компонентов продукции из стекла и керамики, как песок — до 0,8 и полевой шпат — до 0,5.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сандуляк Д. А., Сандуляк А. А., Полисмакова М. Н., Ершова В. А., Сандуляк А. В., Курмышева А. Ю., Соловьев И. А. Методика пондеромоторного контроля магнитной восприимчивости дисперсных образцов и частиц железосодержащих сорбентов // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 7. С. 602–611. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-7-602-611.
2. Сандуляк Д. А., Сандуляк А. А., Полисмакова М. Н., Сандуляк А. В., Харин А. С., Соловьев И. А. Оценка критерияльной объемной доли феррочастиц в порошке для контроля магнитных свойств отдельных частиц // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2023. № 2. С. 16–22. DOI: 10.25791/pribor.2.2023.1387.
3. Sandulyak A. A., Sandulyak A. V., Ershova V. et al. Definition of a magnetic susceptibility of conglomerates with magnetite particles. Particularities of defining single particle susceptibility // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2017. Vol. 441. P. 724–734. DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.06.027.
4. Пат. 2773630 РФ. Способ контроля магнитной восприимчивости частиц по концентрационной зависимости восприимчивости их дисперсных образцов / А. А. Сандуляк, В. А. Ершова, А. В. Сандуляк, М. Н. Полисмакова. Оpubл. 06.06.2022.
5. Сандуляк А. А., Сандуляк Д. А., Полисмакова М. Н., Сандуляк А. В., Ершова В. А., Киселев Д. О. Создание и реализация метода магнитно-реологического контроля магнитной восприимчивости одиночной частицы //

- Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2023. № 5. С. 1–10. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-7-602-611.
6. Пат. 2753159 РФ. Способ магнитно-реологического контроля магнитной восприимчивости частицы / А. А. Сандуляк, А. В. Сандуляк, В. А. Еришова, Д. А. Сандуляк. Оpubл. 12.08.2021.
  7. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1973. 752 с.
  8. Li W., Zhou L., Han Y., Xu R. Numerical simulation and experimental verification for magnetic field analysis of thread magnetic matrix in high gradient magnetic separation // Powder Technology. 2019. Vol. 355. P. 300–308. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.07.024.
  9. Xue Z., Wang Y., Zheng X., Lu D., Li X. Particle capture of special cross-section matrices in axial high gradient magnetic separation: A 3D simulation // Separation and Purification Technology. 2020. Vol. 237. P. 116375. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.116375.
  10. Wu T. H., Mao J. H., Wang J. T., Wu J. Y., Xie Y. B. A New On-Line Visual Ferrograph // Tribology Trans. 2009. Vol. 52. P. 623–631. DOI: 10.1080/10402000902825762.
  11. Baik S. K., Ha D. W., Ko R. K., Kwon J. M. Magnetic field analysis of high gradient magnetic separator via finite element analysis // Physica C. 2012. Vol. 480. P. 111–117. DOI: 10.1016/j.physc.2012.04.036.
  12. Ito D., Nishimura K., Miura O. Removal and recycle of phosphate from treated water of sewage plants with zirconium ferrite adsorbent by high gradient magnetic separation // Journal of Physics: Conf. Series. 2009. Vol. 156. P. 012033. DOI: 10.1088/1742-6596/156/1/012033.
  13. Liu Y.-L., Li D.-W., He J. et al. A periodic magnetic field as a special environment for scientific research created by rotating permanent magnet pair // Rev. of Scientific Instruments. 2018. Vol. 89. P. 105103. DOI: 10.1063/1.5016570.
  14. Zeng J., Tong X., Yi F., Chen L. Selective capture of magnetic wires to particles in high gradient magnetic separation // Minerals. 2019. Vol. 9 (9). P. 509. DOI: 10.3390/min9090509.
  15. Hu K., Sun J., Guo Z. et al. A Novel Magnetic Hydrogel with Aligned Magnetic Colloidal Assemblies Showing Controllable Enhancement of Magnetothermal Effect in the Presence of Alternating Magnetic Field // Advanced Materials. 2015. Vol. 27. P. 2507–2514. DOI: 10.1002/adma.201405757.
  16. Sandulyak A. A., Sandulyak A. V., Polismakova M. N., Kiselev D. O., Ershova V. A., Sandulyak D. A. The Use of Spherical Pole Pieces for Performing the Faraday Balance Method // Instruments and Experimental Techniques. 2018. Vol. 61 (1). P. 123–126. DOI: 10.1134/S0020441218010293.
  17. Пат. 2737609 РФ. Устройство для создания и диагностики зоны стабильной неоднородности магнитного поля / А. А. Сандуляк, А. В. Сандуляк, М. Н. Полисмакова, Д. А. Сандуляк, Д. О. Киселев. Оpubл. 1.12.2020 г.
  18. Пат. 2805765 РФ. Способ магнитно-реологической диагностики магнитной восприимчивости частицы при ее магнитоуправляемом перемещении в жидкости / А. А. Сандуляк, Д. А. Сандуляк, М. Н. Полисмакова, А. В. Сандуляк, А. С. Харин, И. А. Соловьев. Оpubл. 24.10.2023.
  19. Пат. 2813499 РФ. Магнитно-реологический способ определения магнитной восприимчивости частицы / Д. А. Сандуляк, А. А. Сандуляк, В. А. Еришова, А. В. Сандуляк, М. Н. Полисмакова. Оpubл. 12.02.2024.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**Дарья Александровна Сандуляк**

— канд. техн. наук; МИРЭА — Российский технологический университет, кафедра приборов и информационно-измерительных систем; доцент; E-mail: d.sandulyak@mail.ru

Поступила в редакцию 22.03.2024; одобрена после рецензирования 02.04.2024; принята к публикации 16.05.2024.

## REFERENCES

1. Sandulyak D.A., Sandulyak A.A., Polismakova M.N., Ershova V.A., Sandulyak A.V., Kurmysheva A.Yu., Solovov I.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 7(66), pp. 602–611, DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-7-602-611. (in Russ.)
2. Sandulyak D.A., Sandulyak A.A., Polismakova M.N., Sandulyak A.V., Kharin A.S., Solovyov I.A. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2023, no. 2, pp. 16–22, DOI: 10.25791/pribor.2.2023.1387. (in Russ.)
3. Sandulyak A. A., Sandulyak A. V., Ershova V. et al. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, vol. 441, pp. 724–734. DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.06.027.
4. Patent RU 2773630, *Sposob kontrolya magnitnoy vospriimchivosti chastits po kontsentratsionnoy zavisimosti vospriimchivosti ikh dispersnykh obraztsov* (A Method for Monitoring the Magnetic Susceptibility of Particles Based on the Concentration Dependence of the Susceptibility of Their Dispersed Samples), A.A. Sandulyak, V.A. Ershova, A.V. Sandulyak, M.N. Polismakova, Priority 06.06.2022. (in Russ.)

5. Sandulyak A.A., Sandulyak D.A., Polismakova M.N., Sandulyak A.V., Ershova V.A., Kiselev D.O. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2023, no. 5, pp. 1–10, DOI: 10.25791/pribor.5.2023.1406. (in Russ.)
6. Patent RU 2753159, *Sposob magnitno-reologicheskogo kontrolya magnitnoy vospriimchivosti chastitsy* (Method of Magnetic-Rheological Control of the Magnetic Susceptibility of a Particle), A.A. Sandulyak, A.V. Sandulyak, V.A. Ershova, D.A. Sandulyak, Priority 12.08.2021. (in Russ.)
7. Kasatkin A.G. *Osnovnyye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* (Basic Processes and Apparatuses of Chemical Technology), Moscow, 1973, 752 p. (in Russ.)
8. Li W., Zhou L., Han Y., Xu R. *Powder Technology*, 2019, vol. 355, pp. 300–308, DOI: 10.1016/j.powtec.2019.07.024.
9. Xue Z., Wang Y., Zheng X., Lu D., Li X. *Separation and Purification Technology*, 2020, vol. 237, pp. 116375, DOI: 10.1016/j.seppur.2019.116375.
10. Wu T.H., Mao J.H., Wang J.T., Wu J.Y., Xie Y.B. *Tribology Transactions*, 2009, vol. 52, pp. 623–631, DOI: 10.1080/10402000902825762.
11. Baik S.K., Ha D.W., Ko R.K., Kwon J.M. *Physica C*, 2012, vol. 480, pp. 111–117, DOI: 10.1016/j.physc.2012.04.036.
12. Ito D., Nishimura K., Miura O. *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, vol. 156, pp. 012033, DOI: 10.1088/1742-6596/156/1/012033
13. Liu Y.-L., Li D.-W., He J. et al. *Review of Scientific Instruments*, 2018, vol. 89, pp. 105103, DOI: 10.1063/1.5016570.
14. Zeng J., Tong X., Yi F., Chen L. *Minerals*, 2019, no. 9(9), pp. 509, DOI: 10.3390/min9090509.
15. Hu K., Sun J., Guo Z. et al. *Advanced Materials*, 2015, vol. 27, pp. 2507–2514, DOI: 10.1002/adma.201405757.
16. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Polismakova M.N., Kiselev D.O., Ershova V.A., Sandulyak D.A. *Instruments and Experimental Techniques*, 2018, no. 1(61), pp. 123–126, DOI: 10.1134/S0020441218010293.
17. Patent RU 2737609, *Ustroystvo dlya sozdaniya i diagnostiki zony stabil'noy neodnorodnosti magnitnogo polya* (Device for Creating and Diagnosing a Zone of Stable Magnetic Field Inhomogeneity), A.A. Sandulyak, A.V. Sandulyak, M.N. Polismakova, D.A. Sandulyak, D.O. Kiselev, Priority 1.12.2020. (in Russ.)
18. Patent RU 2805765, *Sposob magnitno-reologicheskoy diagnostiki magnitnoy vospriimchivosti chastitsy pri yeye magnitoupravlyayemom peremeshchenii v zhidkosti* (Method for Magnetic-Rheological Diagnostics of the Magnetic Susceptibility of a Particle during Its Magnetically Controlled Movement in a Liquid), A.A. Sandulyak, D.A. Sandulyak, M.N. Polismakova, A.V. Sandulyak, A.S. Kharin, I.A. Solovyov, Priority 24.10.2023. (in Russ.)
19. Patent RU 2813499, *Magnitno-reologicheskiiy sposob opredeleniya magnitnoy vospriimchivosti chastitsy* (Magnetic-Rheological Method for Determining the Magnetic Susceptibility of a Particle), D.A. Sandulyak, A.A. Sandulyak, V.A. Ershova, A.V. Sandulyak, M.N. Polismakova, Priority 12.02.2024. (in Russ.)

#### DATA ON AUTHOR

**Darya A. Sandulyak**

— PhD; MIREA — Russian Technological University, Department of Instruments and Information-Measuring Systems; Associate Professor; E-mail: d.sandulyak@mail.ru

Received 22.03.2024; approved after reviewing 02.04.2024; accepted for publication 16.05.2024