

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского

ЛЕКЦИОННЫЕ ОПЫТЫ ПО ВИЗУАЛИЗАЦИИ СИЛОВЫХ ЛИНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Учебно-методическое пособие

Рекомендовано методической комиссией радиофизического факультета для преподавателей ННГУ, обучающих студентов по направлениям подготовки 03.03.02 «Физика», 03.03.03 «Радиофизика» и специальностям 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», 11.05.02 «Специальные радиотехнические системы»

Нижний Новгород
2020

УДК 537.6/.8
ББК 22.33
Л43

Рецензент: к.ф.-м.н., доцент, Маругин А.В.

Л-43 ЛЕКЦИОННЫЕ ОПЫТЫ ПО ВИЗУАЛИЗАЦИИ СИЛОВЫХ ЛИНИЙ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ: Составители: Казарин П.В., Услугин Н.Ф.: Учебно-
методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет,
2020. – 18 с.

В пособии дано описание лекционных демонстрационных экспериментов по визуализации линий индукции магнитостатического поля, разработанных в центре физических демонстраций кафедры общей физики радиофизического факультета ННГУ. Приведено описание устройств, позволяющих визуализировать линии магнитной индукции, даны фотографии получаемых изображений, обсуждается методика проведения экспериментов на лекциях.

Пособие написано в помощь преподавателям, читающим лекции по курсу общей физики в ННГУ, и может быть полезным студентам физических специальностей, а также школьным учителям физики.

Ответственный за выпуск:
зам. председателя методической комиссии
радиофизического факультета д.ф.-м.н. **Е.З. Грибова**

УДК 537.6/.8
ББК 22.33

В пособии дано описание устройств, позволяющих визуализировать линии магнитной индукции, а также опытов по визуализации магнитостатических полей различной геометрии из арсенала центра физических демонстраций кафедры общей физики радиофизического факультета ННГУ (далее ЦФД). Некоторые из этих опытов стандартны для университетских демонстрационных кабинетов физики, другие являются оригинальными, разработанными на кафедре общей физики ННГУ.

Общепризнано, что лекционные опыты помогают лучшему усвоению студентами изучаемого материала. Это относится и к такому разделу общей физики, как электромагнетизм, в том числе к магнитостатике. «Проявление» линий магнитного поля с помощью магнитных стрелок являлось исторически первым методом визуализации магнитного поля. Этим методом, однако, затруднительно получить общую картину поля. Наглядное представление о конфигурации магнитного поля можно получить другим, так называемым порошковым методом, т.е. с помощью железных опилок, насыпанных на пластину из немагнитного материала. В магнитном поле железные опилки намагничиваются и выстраиваются вдоль линий индукции магнитного поля, визуализируя тем самым его геометрию.

1. Демонстрация линий магнитного поля токов, текущих по проводам различной формы

Полученные порошковым способом картины магнитных полей широко используются на лекциях по физике. Описание этих опытов приводятся во многих учебниках и книгах, посвященных лекционным демонстрациям [1, 2, 3]. В ЦФД для демонстрации на лекциях линий магнитного поля, созданного токами различной конфигурации, используется установка (см. рис. 1), представляющая собой прозрачный каркас в форме параллелепипеда с электрическим разъёмом. По направляющим пазам в верхней части каркаса могут устанавливаться специальные планшеты из прозрачного оргстекла с закреплёнными на них проводами нужной конфигурации (см. рис.2). При этом провода через разъем автоматически подключаются к внешнему источнику напряжения (тока).

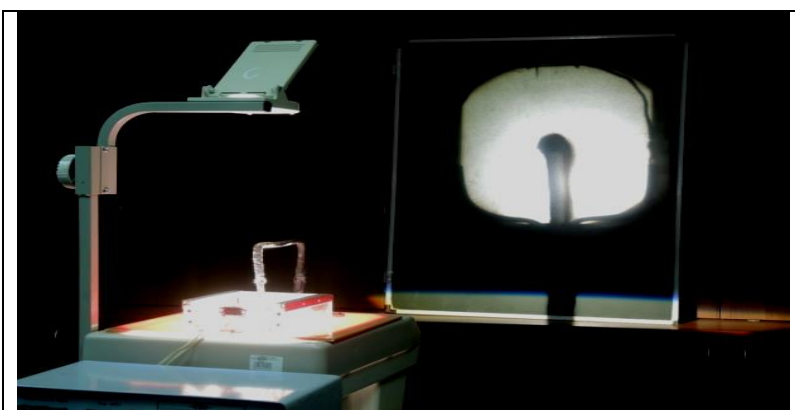


Рис. 1. Установка для наблюдения изображений магнитных полей на экране

Имеющийся комплект планшетов позволяет демонстрировать характерные структуры полей: одиночного проводника с током, круглого витка, соленоида, тороидальной катушки. Для наблюдения получаемых изображений в проходящем свете в проекции на экран, прибор устанавливается на кодоскоп. С помощью веб-камеры изображения можно наблюдать также на экране монитора компьютера.

Процедура демонстрации на лекции картин силовых линий происходит следующим образом. Планшет с выбранной конфигурацией проводника вставляют в направляющие (разъем планшета при этом должен подключиться к разъему самого устройства), на верхнюю поверхность планшета равномерно насыпают небольшое количество железных опилок, включают ток. При лёгком встряхивании (постукивание карандашом по планшету) опилки выстраиваются в цепочки, вдоль линий исследуемого поля. Ток, протекающий через проводник, подбирается экспериментально. С одной стороны он должен быть достаточным для «проявления» картины силовых линий по всей площади планшета, с другой стороны, не позволять опилкам втягиваться в область наибольшего магнитного поля вблизи точек пересечения проводниками плоскости планшета. Источник тока выключается сразу при получении необходимой картины, чтобы не перегревать проводники планшета. Время, необходимое для проведения всех манипуляций с планшетом для демонстрации одной конфигурации поля получается порядка одной минуты. Естественно, это время может увеличиться за счет пояснений, даваемых лектором по ходу эксперимента.

Примеры получающихся картин магнитного поля для токов различной конфигурации приведены на рис. 3 – рис. 5.

На рис. 3 показана картина поля вокруг прямого провода с током. Линии поля представляют собой окружности практически правильной формы. Несколько таких окружностей хорошо видно на рис. 3. Для уменьшения влияния на наблюдаемое поле подводящих проводов, последние разделены симметрично на три части.

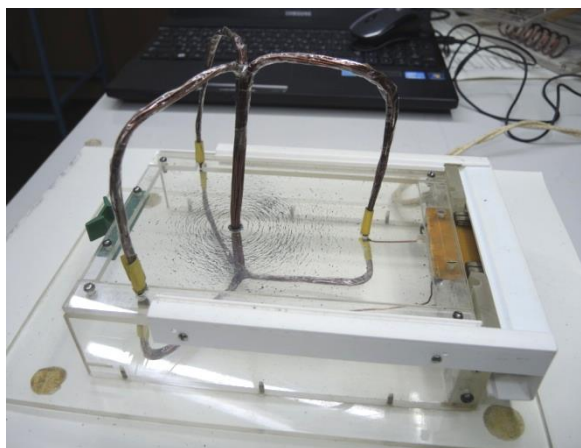


Рис. 2. Внешний вид установки для наблюдения магнитных полей проводников с током



Рис. 3. Круговое поле прямого проводника с током

Магнитное поле витка с током (проволочное кольцо установлено перпендикулярно плоскости планшета) приведено на рис. 4а. и рис. 4б. Хорошо видно, что поле обладает аксиальной симметрией, а рядом с проводником в непосредственной близости от точки пересечения кольцом плоскости планшета оно подобно полю прямого тока.

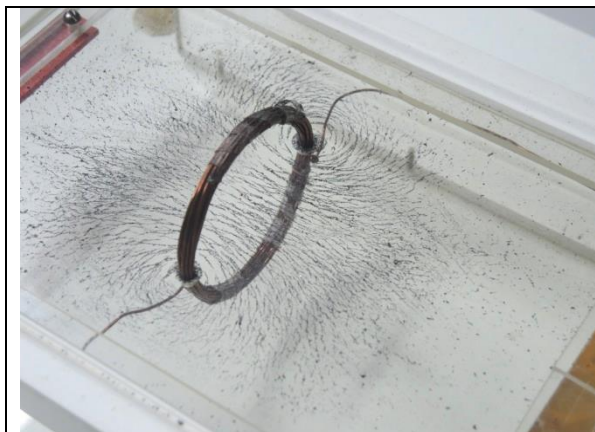


Рис. 4а. Планшет с проводником в виде кольца

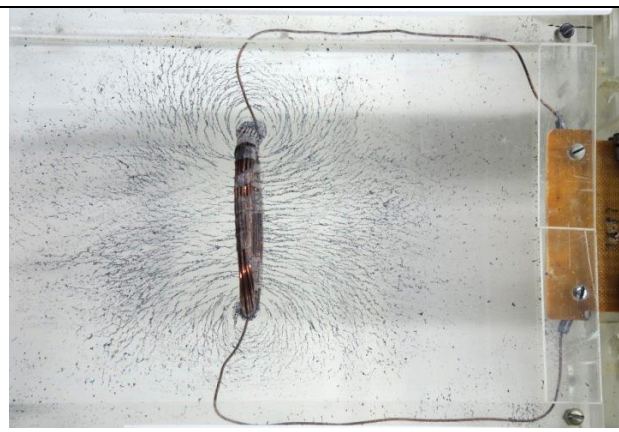


Рис. 4б. Магнитное поле кругового витка с током

Цилиндрическая катушка, называемая соленоидом, намотана одиночным проводом (рис. 5а). Обычно витки в таких катушках располагают плотно и равномерно. Для демонстрационных целей витки разрежены. Видно, что в центральной части катушки поле направлено вдоль оси катушки и в высокой степени однородно, однако ближе к краям соленоида уже заметно нарушение однородности магнитного поля (силовые линии искривляются (расходятся)). Второй соленоид (рис. 5б) изготовлен как совокупность витков с током (последовательно соединённые одинаковые многовитковые катушки). Хорошо видны параллельные силовые линии, что говорит об однородности поля в центральной части соленоида. В областях, непосредственно примыкающим к точкам пересечения витков с плоскостью планшета, заметно нарушение однородности поля (силовые линии «обвивают» витки).

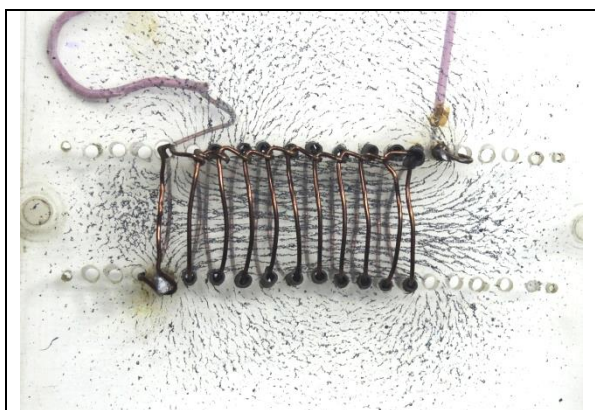


Рис. 5а. Магнитное поле соленоида

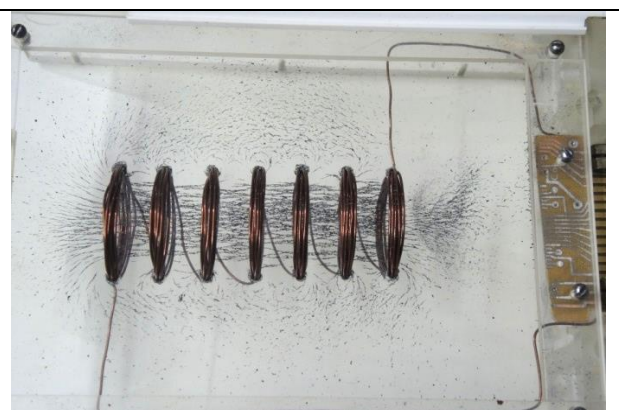


Рис. 5б. Магнитное поле нескольких витков с током, расположенных последовательно

Система одинаковых круговых токов, центры которых равномерно распределены по окружности, образуют тороидальную катушку. Как и в предыдущем случае, такая катушка составлена из нескольких (в нашей

установке из 16, см. рис.6а) многовитковых катушек. На приведённых на рис. 6 фотографиях хорошо видно, что поле сосредоточено лишь внутри тора и практически отсутствует вне него. Рис.6б иллюстрирует хорошо известный факт, что поле тороидальной катушки не совсем однородно ($\sim 1/r$). Можно заметить, что густота силовых линий уменьшается по мере удаления от оси тора.

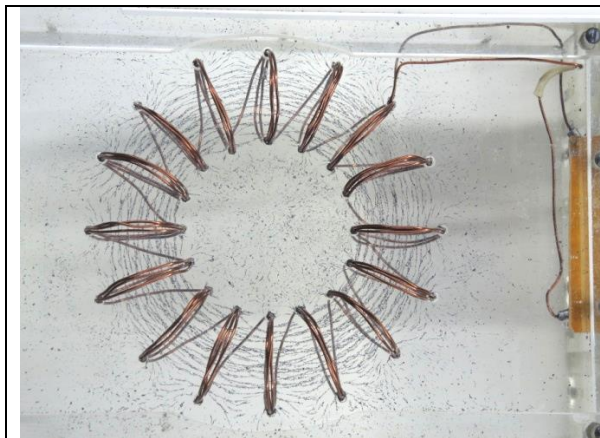


Рис. 6а. Тороидальная катушка и её поле



Рис. 6б. Фрагмент магнитного поля тороидальной катушки

2. Демонстрация преломления линий магнитного поля на границе двух магнетиков

С помощью железных опилок можно продемонстрировать преломление линий магнитного поля на границе двух магнетиков. Как указано, в частности, в работе [4], существуют определенные особенности визуализации соответствующих картин, которые необходимо учитывать при демонстрации этого явления.

На резкой границе двух магнетиков силовая линия магнитного поля (линия вектора \vec{B}) изменяет свое направление (преломляется) [2, 3]. В случае, когда как поверхность раздела, так и сами среды по обе стороны от неё неподвижны, нормальная к ней составляющая B_n непрерывна, т.е.

$$B_{1n} = B_{2n}, \quad (1)$$

а в отсутствие поверхностных токов, кроме того, непрерывна также тангенциальная компонента вектора \vec{H} . То есть можно сказать, что касательная составляющая напряжённости не меняется при переходе через границу раздела двух сред

$$H_{1r} = H_{2r}. \quad (2)$$

Для линейных изотропных магнетиков, когда $\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$, из этих граничных условий можно получить закон преломления линий на границе:

$$\operatorname{tg}\alpha_1/\operatorname{tg}\alpha_2 = \mu_1/\mu_2, \quad (3)$$

где μ_1, μ_2 – значения магнитной проницаемости по разные стороны от поверхности раздела, а α_1 и α_2 – соответствующие углы (см. рис. 7).

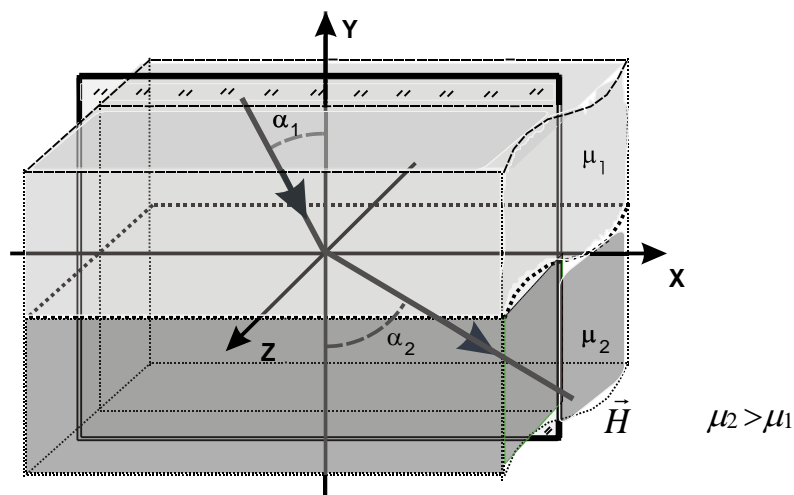


Рис. 7. К преломлению силовых линий вблизи границы двух магнетиков

При постановке опытов по визуализации магнитных полей с помощью железных опилок, в присутствии резких границ магнетиков приходится учитывать, по крайней мере, три важных обстоятельства, влияющих на качество получаемых изображений [4].

Во-первых, планшет с железными опилками невозможно поместить внутри магнетика (где находятся интересующие нас поля). Следовательно, перпендикулярно исследуемой границе двух магнетиков появляется еще одна граница (магнетик-вакуум на рис. 7 в плоскости $z = 0$), планшет с опилками располагается вплотную к этой границе, и с помощью опилок визуализируется поле вблизи этой границы, но вне магнетика. Необходимо учесть, что в плоскости планшета, в этом случае согласно (2), воспроизводится тангенциальная (по отношению к плоскости $z = 0$) составляющая вектора \vec{H} магнитного поля.

Во-вторых, наводимый у железных опилок внешним полем магнитный момент не только приводит к нужному для демонстрационных целей выстраиванию их вдоль линий, но и к силовому взаимодействию опилок с границей раздела, которое можно интерпретировать как взаимное притяжение или отталкивание наводимых магнитных диполей и их зеркальных отражений. Опилки, находящиеся на стороне с меньшим значением μ , будут подтягиваться к границе, а на противоположной, наоборот, отталкиваться от неё. В результате наиболее интересная область поля, примыкающая к поверхности раздела магнетиков, оголяется.

Оба эффекта особенно сильны при большой разнице между μ_1 и μ_2 .

В-третьих, при существенной разнице между значениями магнитной проницаемости сред, согласно (3), уже при малых значениях α_1 угол преломления α_2 становится близким к $\pi/2$, что делает в целом картину не информативной и практически не зависящей от α_1, μ_1, μ_2 .

Поэтому для демонстрации особенностей преломления линий магнитного поля на границе магнетик-вакуум (воздух) необходимо использовать материал с магнитной проницаемостью μ порядка двух-трех единиц. В ЦФД, сотрудниками кафедры общей физики была разработана технология и

изготовлены образцы магнетиков со значением магнитной проницаемости $\mu = 1,8 \div 2,2$ (материал формировался из ферромагнитного порошка и диэлектрического связующего (наполнителя)) [5].

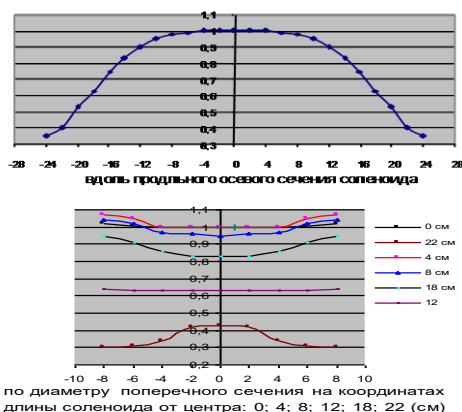
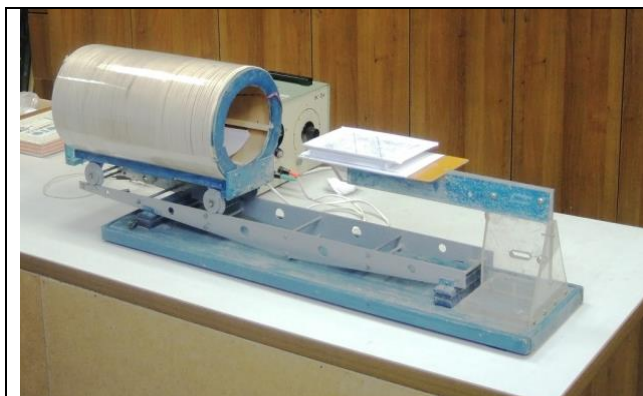


Рис. 8. Установка для демонстрации преломления линий магнитного поля на резкой границе магнетиков

Рис. 9. Результаты измерений магнитного поля внутри соленоида

Фотография установки для демонстрации преломления линий магнитного поля на границе двух магнетиков (магнетик-воздух) приведена на рис. 8. В качестве источника однородного магнитного поля, в которое помещаются образцы магнетиков разной формы, используется соленоид длиной 40 см и диаметром витков 20 см (общее число витков 160). При силе тока до 8А поле \vec{H} внутри катушки достигает 3000 А/м. Соленоид питается от источника переменного тока частотой 50 Гц. В случае использования постоянного тока, опилки и образцы магнетиков после выключения тока имеют заметную остаточную намагниченность, и при удалении планшета от магнетика линии, «нарисованные» опилками, разрушаются. В переменном же поле при плавном уменьшении амплитуды тока в соленоиде происходит автоматическое размагничивание образцов из магнетика и опилок. Планшет с опилками располагается горизонтально, вплотную над образцом. С целью уменьшения нежелательной тряски и рассыпания образовавшихся структур из опилок, образцы и планшет располагаются неподвижно на предметном столике (примерно на уровне оси катушки), а соленоид надвигается на предметный столик с образцом перед включением поля и плавно отодвигается назад после выключения тока. Пластина с картиной силовых линий переносится на кодоскоп для проецирования на экран, либо с помощью веб-камеры полученное изображение оцифровывается и наблюдается на экране компьютера.

Из графиков на рис. 9 видно, что в центре соленоида создается достаточно однородное магнитное поле в области внутри цилиндра (соосного с соленоидом) высотой и диаметром основания примерно по 10 см. Этим и определяется выбор размеров образцов из магнетика и получающихся изображений линий магнитного поля (9x9 см²).

Нежелательное влияние поперечной к плоскости наблюдения составляющей поля (в направлении оси z – на рис. 7) можно значительно уменьшить, располагая над пластинкой (параллельно ей) такие же симметричные образцы магнетиков, однако это приводит к существенному увеличению времени проведения эксперимента на лекции. Уместно отметить, что применение ферропорошка шарообразной формы в качестве опилок практически исключает влияние z -составляющей. Ферропорошок используется от процесса обработки стальных изделий шлифовальной машиной (после очистки его от примесей).



Рис. 10а. «Вакуумный» плоский слой в магнетике ($\mu = 2$)

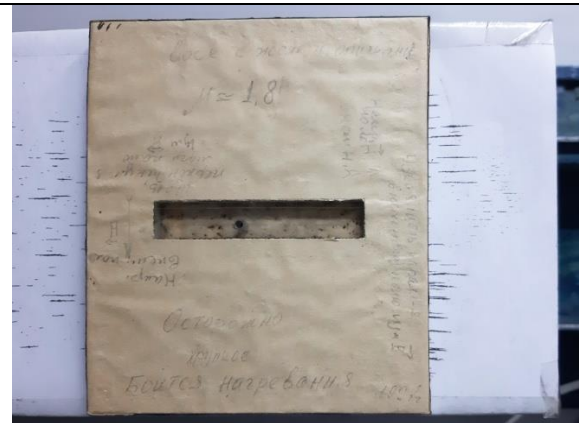


Рис. 10б. Узкая полость-щель в магнетике ($\mu = 1,8$)



Рис. 10в. Образец магнетика ($\mu = 2$) в форме цилиндра

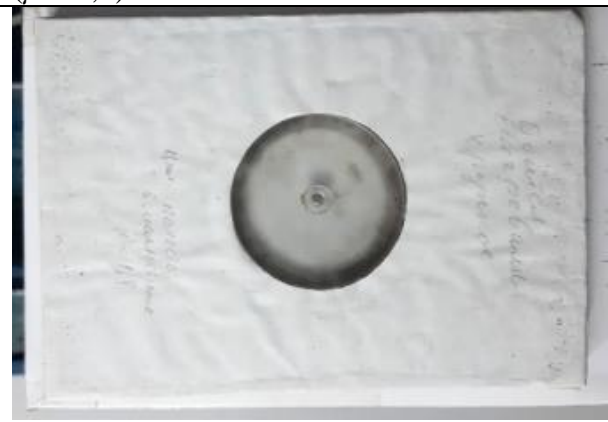


Рис. 10г. Цилиндрическая полость в магнетике с $\mu = 1,8$



Рис. 10д. Образец магнетика эллипсоидальной формы



Рис. 10е. Образец в виде цилиндрического кольца ($\mu = 2$)

На рис. 10 приведены фотографии некоторых образцов магнетиков, на границе которых можно наблюдать картины преломления силовых линий магнитного поля.

Последовательность проведения опытов по визуализации картины преломления линий поля на границе магнетика можно пояснить на примере образца с плоскопараллельным «вакуумным» слоем. Прежде всего, необходимо правильно расположить образец на предметном столике, задав необходимый угол между границей слоя и осью соленоида (фактически этим определяется угол падения линии магнитного поля на границу раздела магнетиков). Сверху на образец помещается индикаторная пластина. В качестве такой пластины используется стеклянная пластинка (если наблюдение линий предполагается в проекции через кодоскоп), либо лист плотной белой бумаги (если наблюдение будет вестись на экране компьютера через веб-камеру). На индикаторную пластину равномерно насыпается ферропорошок из коробки с мелкой сеткой; осторожно надвигается тележка с соленоидом; включается источник напряжения и плавно увеличивается амплитуда тока в катушке. При необходимости слегка постукивают по краям столика (особенно в случае бумаги). После установления опилок в цепочки ток уменьшается, прибор выключается, тележка с соленоидом плавно отодвигается от предметного столика. Стеклянная пластинка с опилками аккуратно переносится на стол кодоскопа, и изображение проецируется на экран.

Если используется веб-камера, то полученное изображение оцифровывается и наблюдается на экране компьютера. Преимущество такого способа наблюдения заключается еще и в том, что можно практически в реальном времени выделить характерные направления выстроенных опилками линий, начертить «усредненную» силовую линию (на рис. 11 показано красным цветом) и оценить значение магнитной проницаемости магнетика.

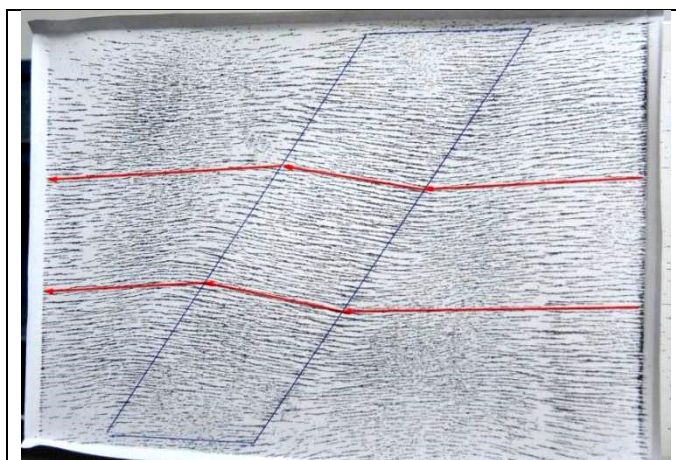
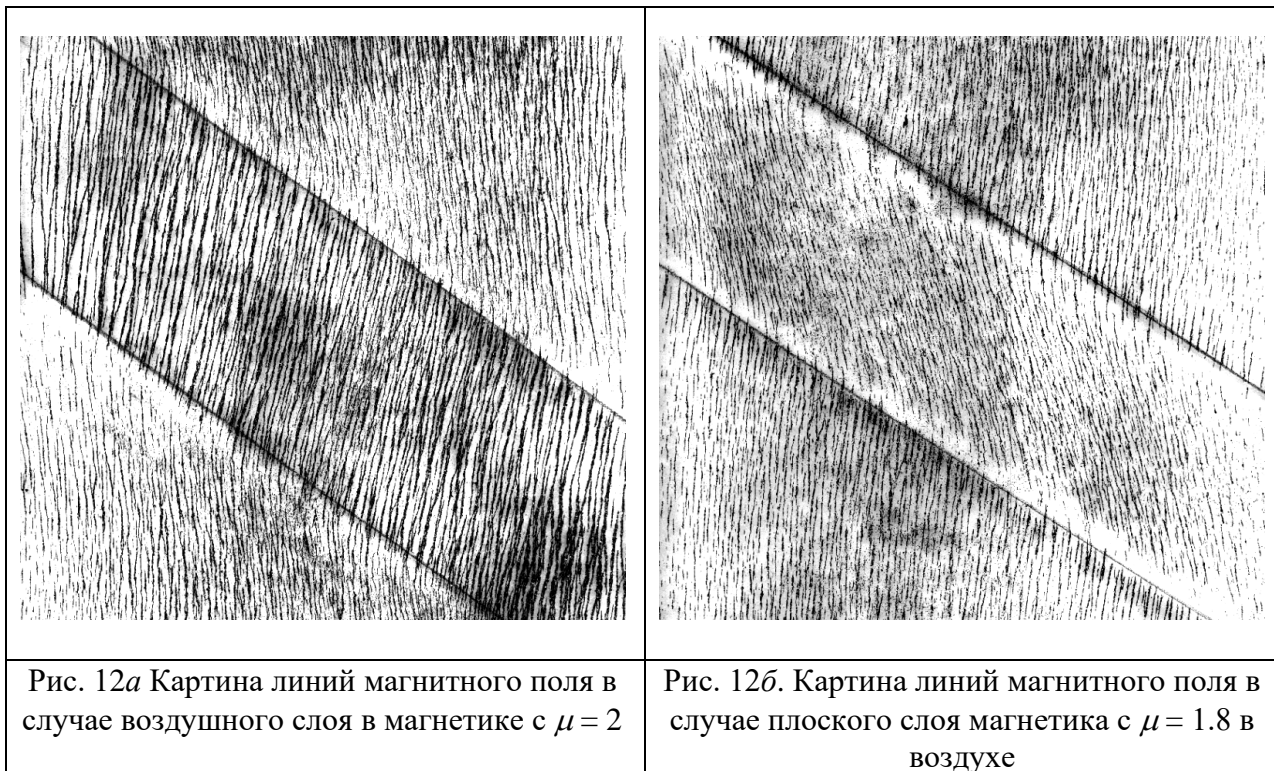


Рис. 11. Преломление линий магнитного поля на двух границах воздушного слоя (вырез) в магнетике с $\mu = 2$

Далее приведен ряд фотографий картин, показывающих структуру магнитного поля в условиях резких границ на образцах магнетиков различной формы. Индикаторная пластина, на которую насыпается ферропорошок, стеклянная, предназначена для наблюдения картины силовых линий через кодоскоп, на большом экране. На фотографиях запечатлены центральные части индикаторных пластин с наиболее характерными для картины преломления магнитных линий областями.

Пример преломления силовых линий на плоской границе магнетик – воздух приведен на рис. 12. Для сравнения на рис. 12а – воздушный слой в магнетике, а на рис. 12б, наоборот, плоский слой магнетика в воздухе. Хорошо

заметно изменение направления магнитного поля и в том, и в другом случае. При этом, как видно на фотографиях, не происходит заметного перераспределения плотности опилок в непосредственной близости границы, характерного для больших отношений μ_1/μ_2 .



На рис. 13 показано распределение опилок, полученное при помещении индикаторной пластины на образец из однородного магнетика с полостью в виде узкой щели. На рис. 13а щель ориентирована «вдоль» поля. Видно, что картина линий почти не искажается. Поскольку, как указывалось ранее, распределение опилок на индикаторной пластине определяется тангенциальной составляющей вектора \vec{H} внутри магнетика, то можно сделать вывод, что напряженность магнитного поля внутри полости такой формы и ориентации совпадает с напряженностью внутри самого магнетика. В случае же щели, ориентированной перпендикулярно полю, в полости и в магнетике одинаковыми являются значения индукции магнитного поля, и следовательно в самой щели напряжённость магнитного поля в μ раз больше, чем в магнетике, что хорошо видно на рис. 13б. Как правило, приведёнными примерами лекторы демонстрируют возможность прямых (силовых) измерений полей в веществе.

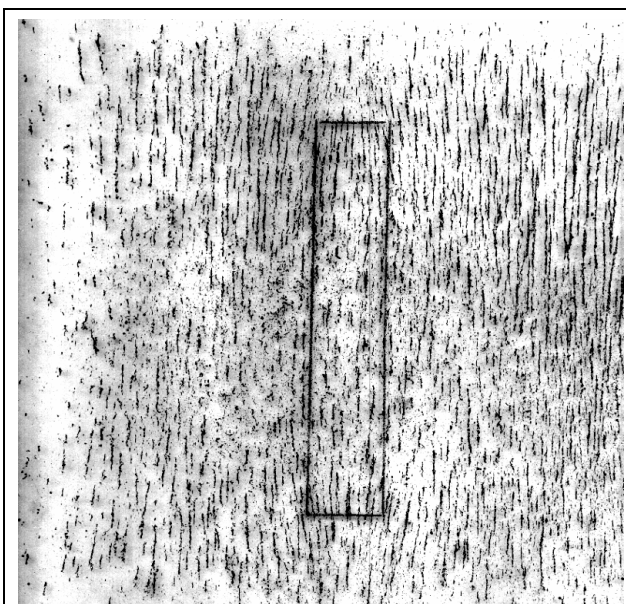


Рис. 13а. Картина линий поля H в магнетике с полостью в виде щели, ориентированной параллельно внешнему полю

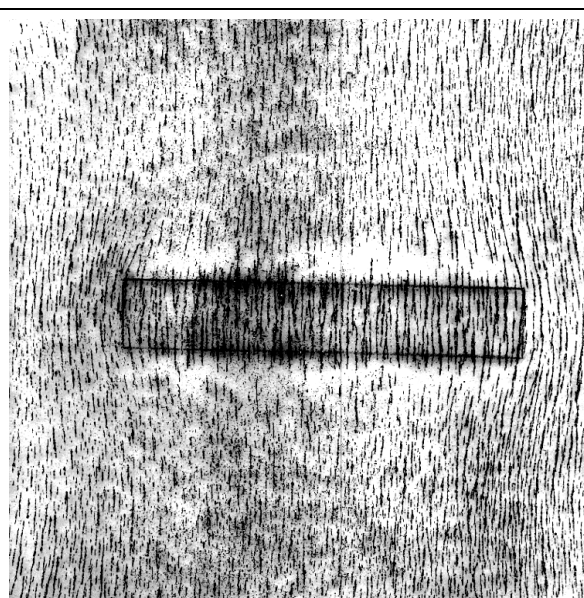


Рис. 13б. Картина линий поля H в магнетике с полостью в виде щели, ориентированной перпендикулярно внешнему полю.

Рисунок 14 иллюстрирует структуру полей вне и внутри сферического образца, а рис. 15 – сферической полости в однородном магнетике. При этом в опытах фактически вместо сферических брались цилиндрические структуры (в виде плоских дисков, параллельных полю), однако получающиеся картины весьма похожи на результаты теоретических расчётов для сфер [2, 3]. В частности, как видно на фотографиях, поле внутри цилиндров с хорошей точностью однородно, причём в первом случае (внутри диска из магнетика) оно слабее, чем невозмущённое внешнее поле (имеет место так называемый

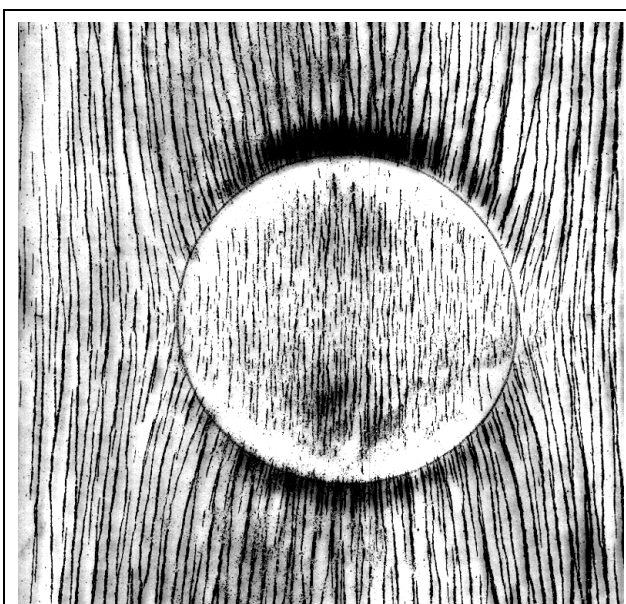


Рис. 14. Картина линий поля H при помещении диска из магнетика ($\mu = 2$) в однородное магнитное поле

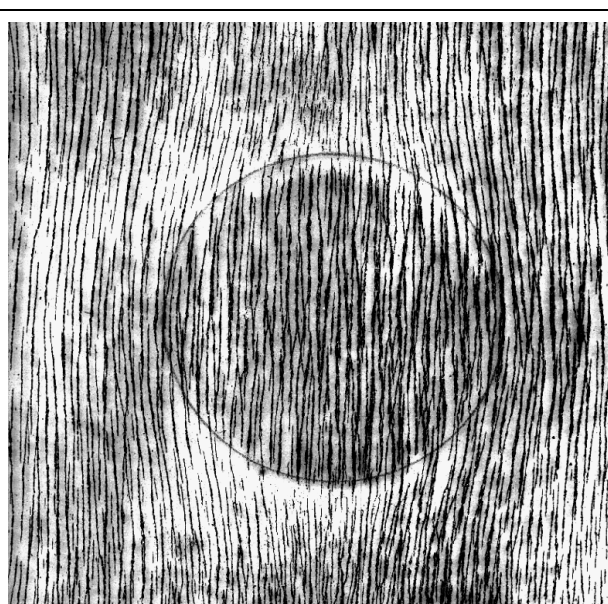
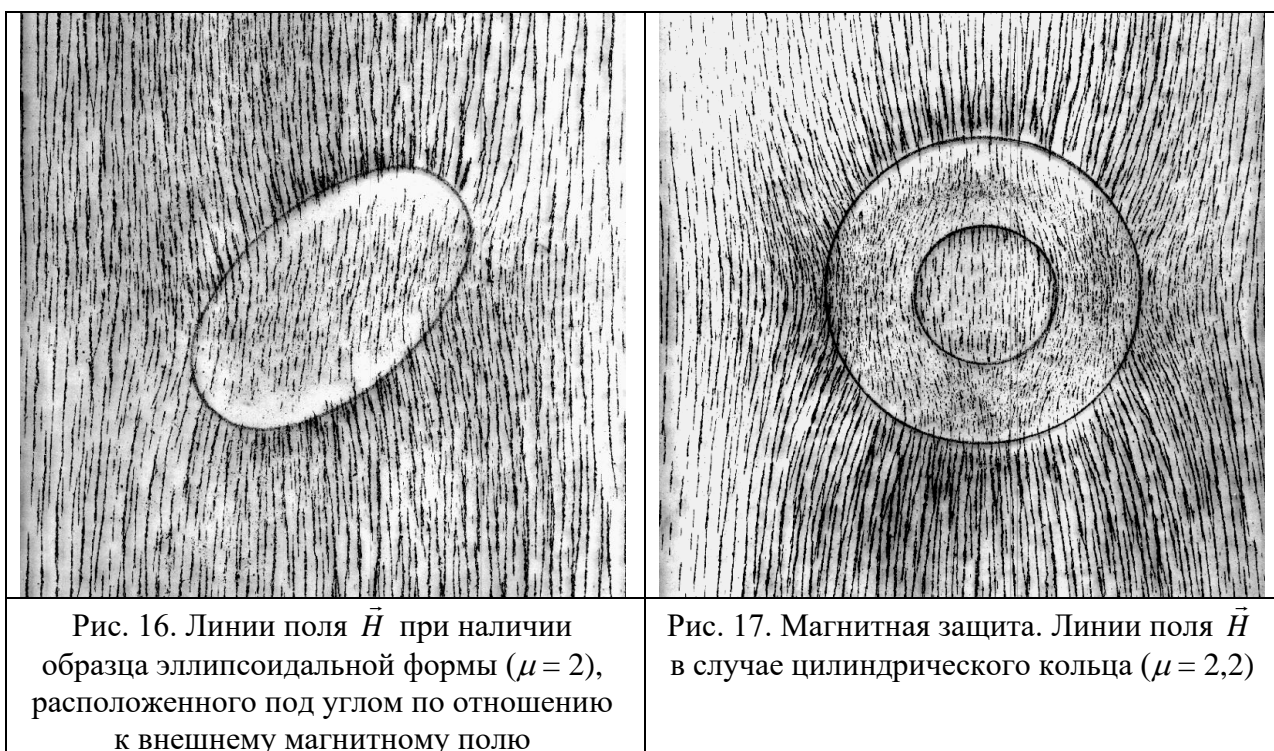


Рис. 15. Картина линий поля H при наличии в магнетике ($\mu = 1.8$) полости в виде диска

размагничивающий фактор), а в полости, напротив, сильнее.

На рис. 16 и рис. 17 приведены фотографии полученных картин силовых линий магнитного поля при наличии объектов в виде эллипсоида и толстостенного цилиндра. Расчеты таких полей оказываются достаточно сложными и, как правило, не рассматриваются подробно в курсе общей физики, однако в качестве иллюстрации знакомство с полями в присутствии таких объектов бывает полезным. Из картин линий магнитного поля видно, что поле внутри образца эллипсоидальной формы остаётся однородным и в случае произвольной ориентации, причем в общем случае оно уже не параллельно внешнему полю (рис. 16).



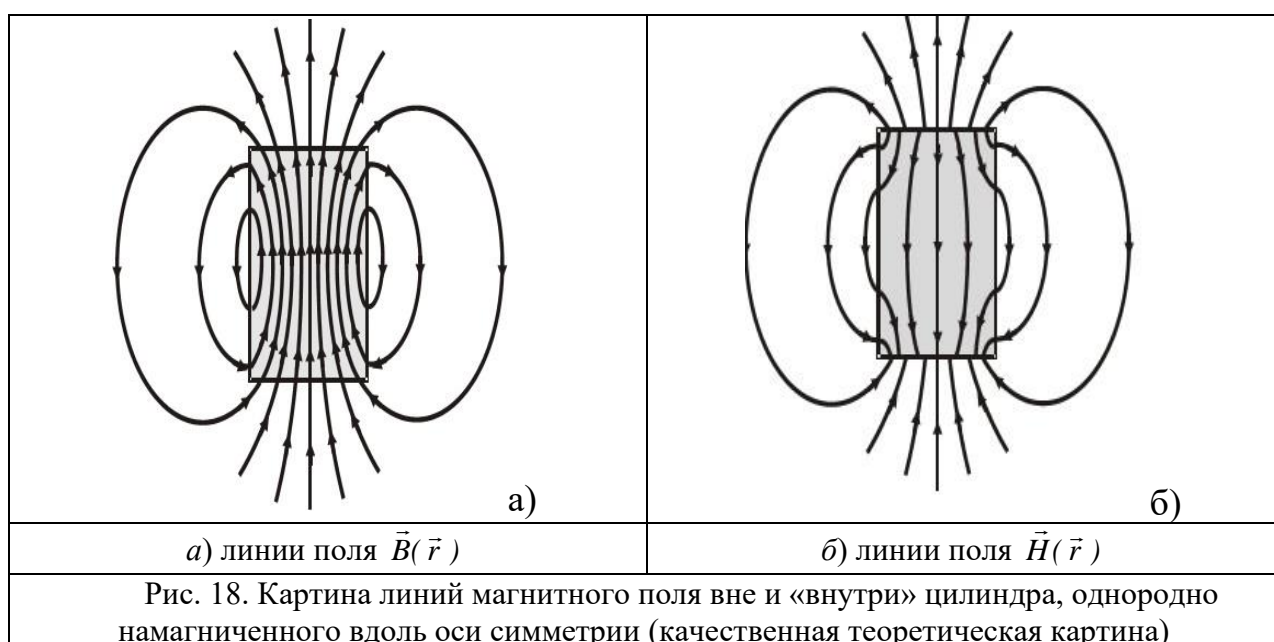
Наконец, рис. 17 фактически иллюстрирует принцип магнитной защиты. Видно, что уже при $\mu = 2,2$ большая часть линий огибает полость внутри цилиндра, и поле внутри последней оказывается заметно ослабленным (и однородным!).

Таким образом, используя образцы магнетиков с $\mu = 1,8 \div 2,2$, изготовленные по специальной технологии, удаётся наглядно воспроизвести картины линий вектора магнитной напряжённости \vec{H} вблизи резких границ магнетиков. Получаемые картины хорошо иллюстрируют преломление линий магнитного поля, концентрацию линий \vec{H} в полостях, по сравнению с внешним полем, и наоборот, разрежение их внутри магнетиков. Хорошо заметна однородность поля внутри образцов и полостей эллипсоидальной формы, хотя в общем случае его направление не совпадает с внешним магнитным полем. На примере магнетика с узкой щелью во время демонстраций можно пояснить зависимость результата измерения магнитного поля внутри полости в веществе от её формы и ориентации. С помощью кольца из магнетика с магнитной

проницаемостью $\mu = 2,2$ демонстрируется возможность создания магнитной защиты.

2. Демонстрация линий поля постоянного магнита

Представляется полезным на лекции поставить опыт, позволяющий наглядно показать особенности структуры магнитного поля в нелинейных средах. В линейных изотропных магнетиках, как и в вакууме, направления векторов индукции \vec{B} и напряжённости \vec{H} , как известно, совпадают [2]. В случае нелинейных магнетиков, в частности постоянных магнитов, вне магнетика (в вакууме) по-прежнему $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$, и направления \vec{B} и \vec{H} одинаковы. Внутри же магнетика поле $\vec{B}(\vec{r})$ и поле $\vec{H}(\vec{r})$ могут существенно различаться.



В случае однородно намагниченных вдоль оси симметрии постоянных магнитов, имеющих прямоугольную или цилиндрическую форму (вектор намагниченности постоянен $\vec{I} = \vec{I}_0 = const$), картина линий $\vec{B}(\vec{r})$ как вне, так и внутри образца качественно аналогична полю соленоида тех же размеров [6, 7]. Эти линии непрерывны и имеют область сгущения в центре образца, где, соответственно, величина $\vec{B}(\vec{r})$ принимает максимальное значение (рис. 5а, рис. 18а). Линии поля $\vec{H}(\vec{r})$, поскольку в магнетике $\vec{H}(\vec{r}) = \vec{B}(\vec{r})/\mu_0 - \vec{I}(\vec{r})$, будут иметь «бочкообразную» форму, причём значение \vec{H} в центре образца будет минимальным, направление же \vec{H} (рис. 18б) на оси образца противоположно направлению \vec{B} .

Чтобы указанные особенности магнитного поля в магните стали заметнее, при визуализации методом магнитных опилок используется постоянный магнит почти квадратной формы (размером 54x50x24 мм) [8]. На магнит сверху помещается тонкий лист стекла, на который насыпаются железные опилки. При постукивании по стеклу, опилки «проявляют» структуру магнитного поля.

При этом, как уже отмечалось (2), из непрерывности тангенциальной компоненты H_t следует, что магнитное поле, действующее на опилки вдоль поверхности стекла, фактически воспроизводит именно поле \vec{H} внутри плоского магнита. Пример получающейся картины приведён на рис. 19. Наглядность картины повышается, если местоположение магнита заранее «оконтурено». Как видно из рисунка, линии внутри контура имеют скорее выпуклую от осевой линии форму, непрерывны на боковых гранях и имеют разрывы на торцах, что действительно соответствует поведению линий \vec{H} внутри постоянного магнита (рис. 18б). С помощью кодоскопа стеклянную пластинку проецируют на экран, предварительно аккуратно сняв её с магнита¹.

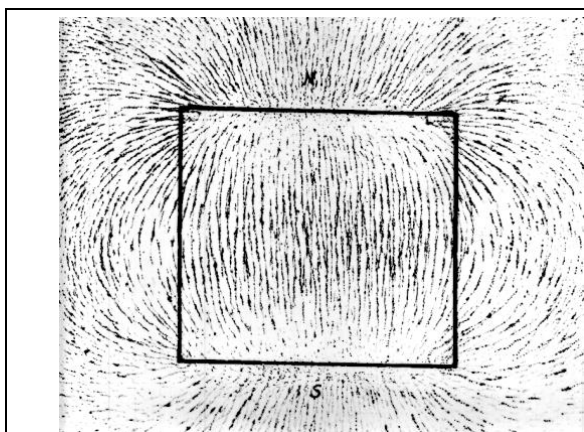


Рис. 19. Визуализация линий поля \vec{H} магнита с помощью железных опилок

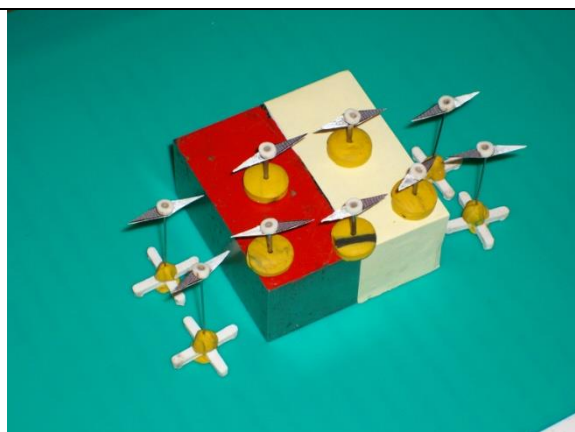


Рис. 20. Визуализация поля постоянного магнита с помощью магнитных стрелок

Более удобным оказывается наблюдение полученных картин с помощью веб-камеры на экране компьютера или монитора (в этом случае не приходится перемещать индикаторную пластину относительно магнита).

Поскольку из получающейся с помощью опилок картины непосредственно не видна полярность магнитного поля, изменение направления вектора \vec{H} вблизи торца магнита можно дополнительно показать с помощью небольшой магнитной стрелки (рис. 20).

4. Модель доменной структуры ферромагнетиков

Демонстрация линий магнитного поля с помощью магнитных стрелок является исторически первым методом визуализации магнитного поля и по сравнению с методом железных опилок позволяет определять и направление магнитного поля. Однако «пространственное разрешение» метода ограничивается размерами магнитной стрелки, а кроме этого, чтобы получить представление о пространственной картине поля, требуется помещать стрелку в разные точки, на что требуется определенное время. Тем не менее, имея несколько магнитных стрелок, можно показать студентам некоторые интересные свойства магнитного поля. На рис. 20 приведена фотография

¹ Качество картинка улучшается, если на стеклянную пластинку, перед тем как насыпать опилки, нанести тонкий слой вязкой жидкости (глицерина, касторового масла).

набора небольших магнитных стрелок, расположенных вблизи постоянного магнита. Несмотря на то, что таких стрелок всего восемь, структуру поля они уже позволяют рассмотреть.

Используя взаимодействие нескольких магнитных стрелок между собой, можно смоделировать образование доменной структуры в магнетиках. Само устройство представляет собой коробку, в прозрачное дно этой коробки вмонтированы иголки, на острия которых надеты магнитные стрелки (в данном устройстве 20 шт.), имеющие возможность вращаться [9]. Изображения стрелок можно спроецировать на экран. В отсутствие внешнего магнитного поля взаимодействие ближних стрелок приводит к их взаимной ориентации – образуется несколько групп стрелок, внутри каждой группы ориентация стрелок совпадает, а ориентации самих групп отличаются. На рис. 21а показан один из возможных случаев расположения стрелок, где заметны группы магнетиков с одинаковой ориентацией. Это вполне соответствует наличию областей самопроизвольного намагничивания – доменов в ненамагниченном ферромагнетике.

На рис. 21б показана картина, изображающая магнитное насыщение. К прибору с двух противоположных сторон подводят разноимённые полюсы прямых магнитов, вынуждая стрелки ориентироваться в одну сторону. Если исключить внешнее магнитное поле, убрав магниты, ориентация стрелок некоторое время сохраняется, но при внешнем воздействии (встряхивании или при движении постоянного магнита поблизости) нарушается, опять появляется «доменная» структура, в общем случае отличная от первоначальной (рис. 21в).



Таким образом, на представленной модели можно показать, что ферромагнитные свойства вещества определяются намагничиванием целых областей – доменов. Взаимодействие магнитных моментов соседних атомов такого вещества ориентирует их в одном направлении, что приводит внутри домена к самопроизвольному намагничиванию до насыщения [2, 3, 7]. Вследствие хаотичности направлений намагничивания в разных доменах, вещество в целом в отсутствие внешнего поля может быть ненамагниченным. Под влиянием внешнего поля происходит перегруппировка областей самопроизвольного намагничивания (доменов) в пользу направлений, совпадающих с внешним полем.

Все опыты, представленные в данном пособии, проводятся на установках, имеющихся в наличии в ЦФД кафедры общей физики, и могут быть использованы на лекциях по физике для студентов специальностей, учебные планы которых предусматривают изучение соответствующих разделов.

Список литературы

1. Лекционные демонстрации по физике. / Под ред. В.И. Ивероновой. - 2-е изд., перераб. - Москва : Наука, 1972. - 639 с.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики: учеб. пособие: для вузов. В 5 т. Т. III. Электричество. - 4-е изд., стереот. - М.: ФИЗМАТЛИТ; Изд-во МФТИ, 2004. - 656 с.
3. Калашников С. Г. Электричество: учебн. пособие. - 6-е изд., стереот. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. - 624 с.
4. Казарин П.В., Степанов Н.С. Опыты по демонстрации структуры магнитного поля в средах с резкими границами // Физическое образование в ВУЗах, МФО. - 1997. - Т. 3, N 3.- С. 82-89.
5. Казарин П.В., Степанов Н.С. Магнитоэлектрический материал для демонстрации картины линий магнитного поля в веществе // XIX научная конференция по радиофизике, посвященная 70-летию радиофизического факультета: сб. научных трудов / ННГУ.- Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2015. - С. 181-182.
6. Абрахам М., Беккер Р. Теория электричества: учеб. пособие: пер. с нем. - Л.-М.: ОНТИ, 1936.-282 с.
7. Парселл Э. Электричество и магнетизм. - М.: Наука, 1975 - 440 с.- (Берклевский курс физики. В 5 т.; Т.2).
8. Казарин П.В., Степанов Н.С. Об одном опыте по демонстрации структуры магнитного поля в нелинейных магнетиках //Томск: Физика. - 1994. - Т. 37, N 10. - С. 122-123.
9. Демонстрационный эксперимент по физике в средней школе / Под ред. А.А. Покровского. Ч.1. - М.: Просвещение, 1978. - 351 с.

ЛЕКЦИОННЫЕ ОПЫТЫ ПО ВИЗУАЛИЗАЦИИ СИЛОВЫХ ЛИНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Составители:

Петр Васильевич Казарин
Николай Федорович Услугиин

Учебно-методическое пособие

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского».
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.