

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 620.179.14

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ЗАЗОРА НА
РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПЕТЛИ МАГНИТНОГО
ГИСТЕРЕЗИСА В СОСТАВНОЙ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

© 2026 г. А. В. Батуева*, Д. Г. Ксенофонов**, О. Н. Василенко***

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева

Уральского отделения Российской академии наук

Россия, 620108, Екатеринбург, улица Софьи Ковалевской, 18

**E-mail: batuevaav@imp.uran.ru*

***E-mail: ksenofontov@imp.uran.ru*

****E-mail: vasilenko@imp.uran.ru*

Поступила в редакцию 28.04.2026

После доработки 03.06.2026

Принята к публикации 14.06.2026

Выполнено исследование по оценке влияния величины немагнитного зазора на результаты измерений петель магнитного гистерезиса в составной магнитной цепи “приставной преобразователь – объект контроля” для различных классов ферромагнетиков. В качестве намагничивающего устройства применяется приставной преобразователь, оптимизированный методом конечных элементов для задач многопараметрового анализа магнитной структуроскопии. Проведены экспериментальные измерения и построены цифровые модели в Comsol Multiphysics, релевантные оборудованию в натурном эксперименте. Для описания магнитного гистерезиса ферромагнетиков в программном виде используется встроенная в электромагнитный модуль AC/DC-модель Джайлса–Атертона. Получены экспериментальные и расчетные наборы петель магнитного гистерезиса, качественно отражающие пространственное распределения магнитных полей в составной магнитной цепи в местах измерений, соответствующих областям чувствительности датчиков Холла. Установлены зависимости измеряемых магнитных характеристик (максимальной магнитной индукции $B_{\max}$, остаточной магнитной индукции B_r , коэрцитивной силы H_c) от величины немагнитного зазора. Показаны ограничения применимости классической модели Джайлса–Атертона в ходе реализации моделирования методом конечных элементов.

Ключевые слова: многопараметровый контроль, цифровое моделирование, магнитный гистерезис, модель Джайлса–Атертона, составная магнитная цепь, зазор

1. ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение надежности и безопасной эксплуатации ответственных металлоконструкций (трубопроводов, корпусов, валов) в энергетике, на транспорте и в машиностроении напрямую зависит от эффективности методов неразрушающего контроля, среди которых особое место занимают магнитные методы, чувствительные к

структурному состоянию ферромагнитных материалов. Коэрцитиметрия как метод однопараметрового контроля реализуется во многих действующих приборах для магнитной структуроскопии, позволяя эффективно выявлять структурные изменения благодаря высокой чувствительности коэрцитивной силы к свойствам ферромагнитного материала. Однако при локальном намагничивании объектов различных типоразмеров пространственное распределение магнитных полей зависит от ряда мешающих факторов, таких как немагнитный зазор, форма и размеры объекта исследования. В свою очередь, эти факторы приводят к перераспределению магнитного поля в измерительной системе, что вносит вклад в регистрируемый сигнал и, как следствие, искажает достоверную оценку состояния контролируемого объекта.

Исследования, проведенные к концу XX века, привели к выводу о том, что для достоверной оценки структурных изменений объекта необходим переход к многопараметровому контролю. Развитие магнитных средств многопараметрового контроля создает перспективное направление для магнитных исследований при помощи многоцелевых аппаратно-программных систем [1]. Результаты измерений петли магнитного гистерезиса и соответствующих магнитных характеристик зависят от конструкции приставного преобразователя, типа и месторасположения датчиков, регистрирующих магнитное поле [2].

Традиционно подход к разработке новых средств измерения и методик контроля магнитных параметров базировался преимущественно на эмпирических данных [3, 4]. В настоящее время все более широкое применение при проведении научных исследований получает цифровое моделирование. Однако большинство исследований, реализующих моделирование физических процессов в рамках магнитного неразрушающего контроля методом конечных элементов (МКЭ), учитывает среди характеристик объектов исследования только кривую намагничивания ферромагнетиков [5]. Для описания пространственного распределения магнитных полей при локальных измерениях в составной магнитной цепи по циклу перемагничивания изделия необходимо учитывать гистерезис магнитных свойств ферромагнетиков. Математическая модель магнитного гистерезиса Джайлса–Атертона [6], реализованная в программном модуле AC/DC Comsol Multiphysics, позволяет спрогнозировать процессы перемагничивания ферромагнетика по петле магнитного гистерезиса. Построение достоверных цифровых моделей измерительной магнитной системы [7] позволяет с высокой точностью прогнозировать пространственное распределение магнитных полей, что открывает широкие перспективы для разработки новых средств измерений.

В работе предложена усовершенствованная конструкция измерительного

преобразователя для многопараметрового магнитоструктурного анализа ферромагнитных плоских объектов. Измерение при помощи аппаратно-программной системы позволяет получать петли магнитного гистерезиса в ходе цикла перемагничивания ферромагнетика. Представлено изменение пространственного распределения магнитных полей в зоне размещения датчиков Холла в натурном эксперименте и цифровых моделях.

Достоверность измерений статических магнитных характеристик в существенной степени зависит от ряда мешающих факторов. Стабильность результатов измерений магнитных характеристик при изменении величины немагнитного зазора традиционно являлась мерой достоверности при оценке новых средств измерений [8].

Данное исследование посвящено количественной оценке влияния немагнитного зазора в составной магнитной цепи на результаты измерений петли магнитного гистерезиса для различных классов ферромагнитных материалов, а также исследованию возможности применения имеющегося инструмента моделирования для оценки влияния мешающих факторов на примере зазора на результаты расчета.

2. СРЕДСТВА, МЕТОДИКИ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование влияния величины немагнитного зазора в составной магнитной цепи “преобразователь – объект контроля” проведены на плоских стандартных образцах остаточной магнитной индукции СОП ОМИ 02-2021 (ОМИ 2, 5, 6, 10), имеющих размеры $90 \times 40 \times 4.5$ мм³. Образцы подвергались закалке при различных температурах $T_{\text{зак}}$ и отпуску при различных температурах $T_{\text{отп}}$: ОМИ 2 (сталь 95Х18, $T_{\text{зак}} = 1090$ °С, $T_{\text{отп}} = 400$ °С); ОМИ 5 (сталь 65Г, $T_{\text{зак}} = 870$ °С, $T_{\text{отп}} = 200$ °С); ОМИ 6 (сталь 10, $T_{\text{зак}} = 930$ °С, $T_{\text{отп}} = 400$ °С); ОМИ 10 (сталь 65Г, $T_{\text{зак}} = 870$ °С, $T_{\text{отп}} = 600$ °С). Выбор образцов обусловлен различным диапазоном магнитных характеристик ферромагнетиков (максимальной магнитной индукции B_{max} , остаточной магнитной индукции B_r , коэрцитивной силы H_c). Петли магнитного гистерезиса вещества для указанных образцов измерены при помощи магнитоизмерительного комплекса Remagraph C-500 согласно стандартной международной методике IEC 60404-4 [9]. На основании этих данных были подобраны параметры модели (M_s , A , α , c , k) магнитного гистерезиса Джайлса–Атертона [5, 6] при помощи программы PIJAM (Parameter identification of Jiles-Atherton model) [10] для задания гистерезисных свойств ферромагнитных материалов в цифровом моделировании. Петли магнитного гистерезиса вещества (синие линии) и результаты подбора параметров модели (красные линии) представлены на рис. 1.

Рис.1. Экспериментальные измерения петель магнитного гистерезиса на магнитоизмерительной установке Remagraph C-500

Измерения статических магнитных характеристик проводились при помощи оригинального автоматизированного программно-аппаратного комплекса магнитной структуроскопии. Структурная схема измерительной системы представлена на рис. 2. Персональный компьютер (ПК) содержит интерфейс для задания настроек, запуска и остановки цикла перемagnetивания и вывода результатов измерений. Микроконтроллер непосредственно управляет циклом измерений согласно настройкам, полученным от ПК, таких как длительность цикла, амплитуда тока. Цикл измерений содержит этапы магнитной подготовки и самокалибровки, а также цикл перемagnetивания. В процессе перемagnetивания управляющий сигнал от цифро-аналогового преобразователя подается на усилитель мощности, который создает намагничивающий ток в обмотках электромагнита, за счет чего появляется магнитный поток в составной магнитной цепи “преобразователь – объект контроля”. В процессе перемagnetивания измеряются магнитная индукция в магнитопроводе (датчик Холла 1 – индукция B), напряженность магнитного поля на поверхности объекта контроля (датчик Холла 2 – напряженность H) и величина тока в намагничивающих катушках преобразователя. Предварительно была проведена градуировка датчиков Холла в соленоиде путем сличения результатов измерений с показаниями измерителя магнитной индукции Ш1-8 по величине напряженности магнитного поля H [А/см] и магнитной индукции B [Тл].

Рис.2. Структурная схема измерительной системы

В качестве намагничивающего устройства использовалась конструкция измерительного преобразователя, усовершенствованная для задач многопараметровой магнитной структуроскопии: размер полюса составил 10×30 мм²; общий размер контактной площадки преобразователя 30×35 мм², высота преобразователя 50 мм. Магнитодвижущая сила в намагничивающей обмотке равнялась 855 А. Положение датчика Холла в зазоре магнитопровода и в межполюсном пространстве строго фиксируется. Расположение датчиков обусловлено результатами пространственного распределения магнитного поля. Выбраны наиболее чувствительные и стабильные зоны к измерению тангенциальной составляющей магнитного поля, что позволяет получить петли магнитного гистерезиса тела, пропорциональные магнитным характеристикам вещества. Результаты измерений напрямую зависят от структурных изменений в ферромагнетике. Схема измерительного преобразователя представлена на рис. 3.

Рис.3. Схема измерений при помощи приставного преобразователя на исследуемых образцах

В составной магнитной цепи варьировалась величина немагнитного зазора d между полюсами приставного преобразователя и объектами исследования в диапазоне от 0 до 2.9

мм. Зазор сформирован набором пластин из немагнитного полимерного материала (полилактид), полученных методом послойного синтеза (3D-печать).

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПРИСТАВНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Для реализации измерительной системы в цифровом виде использовалось программное обеспечение Comsol Multiphysics 6.0. Цифровые модели отражали реальные размеры и условия экспериментальных исследований. Проведен расчет в рамках задач магнитостатики в цикле перемагничивания ферромагнитных образцов. Ферромагнитные свойства в цифровых моделях заданы при помощи модели Джайлса–Атертона, которая является встроенным инструментом электромагнитного модуля AC/DC. Тип исследований выбран в модуле Time Dependent, он предназначен для решения задач, в которых поля переменных меняются во времени. Изменение тока во времени описывается формулой синусоидального тока: $I = I(t) = I_0 \sin(\omega t)$, где I_0 – амплитуда силы тока, ω – циклическая (круговая) частота колебаний. Период колебаний в расчетах был равен 10 с.

Получены результаты пространственных распределений магнитных полей и потока в составной магнитной цепи. На рис. 4 представлены трехмерная модель составной магнитной цепи и пространственное распределение магнитной индукции по центру в разрезе. В рамках исследований проведена верификация цифровых моделей для составной магнитной цепи без объекта контроля.

Рис.4. 3D-модель составной магнитной цепи “приставной преобразователь – объект контроля” (а) и пространственное распределение магнитной индукции при отсутствии

Конструкция приставного преобразователя позволяет выделить ряд преимуществ в рамках проведения многопараметровой магнитной структуроскопии.

1) Для малогабаритной конструкции приставного преобразователя при значениях тока 1.5 А и витков в катушках 570 штук обеспечивается локальное промагничивание, близкое к техническому насыщению объекта. Напряженность магнитного поля в межполюсном пространстве составляет 400 А/см для магнитомягких образцов (коэрцитивная сила менее 40 А/см) и более 600 А/см для магнито жесткого образца при отсутствии зазора в составной магнитной цепи между полюсами преобразователя и объектом контроля. Межполюсное пространство составляет 10 мм, что позволяет локально проводить диагностику магнитных свойств в разных участках изделия.

2) Магнитопровод во время работы намагничивается пропорционально намагничивающему току в катушках, при этом не достигая технического насыщения, что, в свою очередь, позволяет регистрировать датчиком Холла магнитный поток в перемычке, прямо пропорциональный магнитному потоку в объекте контроля, по всему циклу

перемангничивания ферромагнитного плоского изделия.

3) Измеряемые петли магнитного гистерезиса пропорциональны петлям магнитного гистерезиса вещества, полученным по стандартной международной методике на магнитоизмерительной установке Remagraph C-500 при отсутствии зазора в магнитной цепи между полюсами приставного преобразователя и объектом контроля.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ

В соответствии с описанными выше методиками были проведены измерения петель магнитного гистерезиса исследуемых образцов. На рис. 5 представлены результаты экспериментальных измерений при помощи автоматизированного программно-аппаратного комплекса магнитной структуроскопии и моделирования составной магнитной цепи “приставной преобразователь – объект контроля”. Показано качественное совпадение этих данных.

Рис.5. Петли магнитного гистерезиса в зависимости от величины немагнитного зазора для образца ОМИ

На рис. 6–8 представлены зависимости относительного изменения статических магнитных характеристик (максимальной магнитной индукции $B_{\max}$, остаточной магнитной индукции B_r , коэрцитивной силы H_c) от величины немагнитного зазора d . Синим и красным цветами представлены зависимости, полученные от датчиков Холла в экспериментальных и цифровых исследованиях соответственно. Черным цветом показаны данные в центре объекта контроля в зоне межполюсного пространства магнитопровода.

Рис.6. Относительное изменение максимальной магнитной индукции $B_{\max}$ в зависимости от величины зазора d для образцов ...

Рис.7. Относительное изменение остаточной магнитной индукции B_r в зависимости от величины зазора d для образцов ...

Рис.8. Относительное изменение коэрцитивной силы H_c в зависимости от величины зазора d для образцов ...

Полученные зависимости дают количественную оценку изменения измеряемых магнитных характеристик с увеличением величины зазора. Экспериментальное изменение величины максимальной магнитной индукции $B_{\max}$ совпадает количественно с результатами моделирования. Значения остаточной магнитной индукции B_r в результате моделирования завышены. При этом значение коэрцитивной силы H_c растет в зависимости от типа ферромагнетика. Наблюдаемые отклонения расчетов обуславливаются

особенностями классической модели Джайлса–Атертона, которая не может достоверно описывать частные петли магнитного гистерезиса. Это наиболее значимо проявляется при анализе петель магнитного гистерезиса, получаемых в центре объекта контроля: при явном уменьшении максимальной магнитной индукции $B_{\max}$ (рис. 6) коэрцитивная сила H_c не меняется или меняется слабо (10% для ОМИ 10).

С увеличением зазора остаточная магнитная индукция B_r падает в зависимости от типа ферромагнетика: для низкокоэрцитивных образцов (ОМИ 6, ОМИ 10) происходит резкое экспоненциальное падение значений, однако при высоких значениях коэрцитивной силы (ОМИ 2, ОМИ 5) эта характеристика убывает линейно и постепенно. Величина и характер изменения магнитных характеристик в большей степени определяются формой предельной петли магнитного гистерезиса. На рис. 9 графически показано влияние немагнитного зазора на зависимости величин магнитных характеристик, измеренных с помощью программно-аппаратного комплекса, от коэрцитивной силы H_c (а) и остаточной магнитной индукции B_r (б) материала образцов, определенных по методике IEC 60404-4. Из полученных данных следует, что наличие зазора в составной магнитной цепи вносит нелинейность в градуировочную характеристику остаточной магнитной индукции B_r . В этом случае результаты измерений характеристики B_r не позволяют дать корректную оценку структурных изменений характеристик изделия. Для градуировочной характеристики коэрцитивной силы H_c наличие зазора 1 мм в магнитной цепи вносит погрешность измерений порядка 10%, но градуировка сохраняет свою линейность (чувствительность к структурным изменениям).

Рис.9. Влияние немагнитного зазора на зависимости показаний программно-аппаратного комплекса от остаточной магнитной индукции

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданы цифровые модели составной магнитной цепи "преобразователь – объект контроля", учитывающие магнитный гистерезис. Результаты моделирования совпадают с экспериментальными данными для максимальной и остаточной магнитной индукции.

Показаны ограничения применимости классической модели Джайлса–Атертона в задачах конечно-элементного моделирования. Модель требует модификации для учета перемагничивания по частным петлям магнитного гистерезиса и магнитных свойств широкого класса ферромагнетиков для получения достоверных результатов пространственного распределения магнитных полей и потоков в магнитных измерительных системах.

Разработанная конструкция приставного преобразователя доказала свою

работоспособность для многопараметровой магнитной структуроскопии. Измеряемые петли магнитного гистерезиса пропорциональны петлям магнитного гистерезиса вещества. Полученные экспериментальные и расчетные зависимости позволяют количественно оценивать погрешность измерений при изменении зазора, они могут быть использованы для коррекции результатов и совершенствования методик неразрушающего контроля ферромагнитных изделий.

В результате выполненных экспериментального и расчетного исследований установлены зависимости измеряемых магнитных характеристик (максимальная магнитная индукция $B_{\max}$, остаточная магнитная индукция B_r , коэрцитивная сила H_c) от величины немагнитного зазора. Показано, что с увеличением немагнитного зазора величина максимальной магнитной индукции $B_{\max}$ монотонно снижается для всех типов ферромагнетиков; величина остаточной магнитной индукции B_r падает экспоненциально у низкокоэрцитивных материалов и линейно – у высококоэрцитивных; величина коэрцитивной силы H_c уменьшается примерно на 10% при величине зазора 1 мм в составной магнитной цепи, при этом ее градуировочная характеристика сохраняет линейность. Установлено, что наличие зазора вносит нелинейность в градуировку по остаточной индукции B_r .

Результаты исследования демонстрируют, что наличие даже незначительного зазора оказывает существенное влияние на результаты измерений магнитных характеристик, особенно остаточной магнитной индукции, следовательно, при эксплуатации разработанной конструкции приставного преобразователя необходимо исключать любой зазор и стремиться к его полному устранению между полюсами и объектом контроля.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ для ИФМ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костин В.Н., Смородинский Я.Г. Дефектоскопия. 2017. № 7. С. 23. <https://elibrary.ru/item.asp?id=29402902>
2. Костин В.Н., Царькова Т.П., Сажина Е.Ю. Дефектоскопия. 2001. № 1. С. 15.
3. Михеев М.Н. Изв. АН СССР. ОТН. 1943. № 3–4. С. 68.
4. Мельгуй М.А. Дефектоскопия. 2015. № 2. С. 27. <https://elibrary.ru/item.asp?id=23734910>
5. Василенко О.Н. Методы и средства многопараметровой магнитной структуроскопии изделий с использованием составных разомкнутых магнитных цепей. Дис. ... канд. техн. наук. ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, 2014. 131 с.

6. *Jiles D., Atherton D. J.* Magn. Magn. Mater. 1986. V. 61. P. 48.
[https://doi.org/10.1016/0304-8853\(86\)90066-1](https://doi.org/10.1016/0304-8853(86)90066-1)
7. *Батуева А.В., Василенко, О.Н.* Дефектоскопия. 2025. № 10. С. 13.
<https://doi.org/10.7868/s3034498025100021>
8. *Буда Г.В.* Дефектоскопия. 2010. № 11. С. 62. <https://elibrary.ru/item.asp?id=16343020>
9. IEC 60404-4:1995 Magnetic materials. Part 4: Methods of measurement of d.c. magnetic properties of iron and steel.
10. *Батуева А.В., Василенко О.Н., Ксенофонтов Д.Г.* Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025666273 РФ. Parameter identification of Jiles-Atherton model “PIJAM”: № 2025665375: заявл. 24.06.2025, опубл. 24.06.2025.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Экспериментальные измерения петель магнитного гистерезиса на магнитоизмерительной установке Remagraph C-500 (синие линии) и результаты подбора параметров математической модели магнитного гистерезиса Джайлса–Атертона (красные линии) для образцов ОМИ 2 (**а**), ОМИ 5 (**б**), ОМИ 6 (**в**), ОМИ 10 (**г**)
- Рис. 2.** Структурная схема измерительной системы
- Рис. 3.** Схема измерений при помощи приставного преобразователя на исследуемых образцах
- Рис. 4.** 3D-модель составной магнитной цепи “приставной преобразователь – объект контроля” (**а**) и пространственное распределение магнитной индукции при отсутствии зазора в центральном сечении для образца ОМИ 6 при токе 1.5 А (**б**)
- Рис. 5.** Петли магнитного гистерезиса в зависимости от величины немагнитного зазора для образца ОМИ 5: **а** – экспериментальные результаты, измеренные датчиками Холла, **б** – результаты моделирования, полученные в местах расположения датчиков Холла
- Рис. 6.** Относительное изменение максимальной магнитной индукции $B_{\max}$ в зависимости от величины зазора d для образцов ОМИ 2 (**а**), ОМИ 5 (**б**), ОМИ 6 (**в**), ОМИ 10 (**г**): синим цветом показаны экспериментальные результаты, измеренные датчиками Холла; красным – результаты моделирования, полученные в местах расположения датчиков Холла; черным – результаты моделирования в объекте контроля по центру
- Рис. 7.** Относительное изменение остаточной магнитной индукции B_r в зависимости от величины зазора d для образцов ОМИ 2 (**а**), ОМИ 5 (**б**), ОМИ 6 (**в**), ОМИ 10 (**г**): синим цветом показаны экспериментальные результаты, измеренные датчиками Холла; красным – результаты моделирования, полученные в местах расположения датчиков Холла; черным – результаты моделирования в объекте контроля по центру
- Рис. 8.** Относительное изменение коэрцитивной силы H_c в зависимости от величины зазора d для образцов ОМИ 2 (**а**), ОМИ 5 (**б**), ОМИ 6 (**в**), ОМИ 10 (**г**): синим цветом показаны экспериментальные результаты, измеренные датчиками Холла; красным – результаты моделирования, полученные в местах расположения датчиков Холла; черным – результаты моделирования в объекте контроля по центру.

Рис. 9. Влияние немагнитного зазора на зависимости показаний программно-аппаратного комплекса от остаточной магнитной индукции (**а**) и абсолютных значений коэрцитивной силы (**б**) образцов ОМИ.

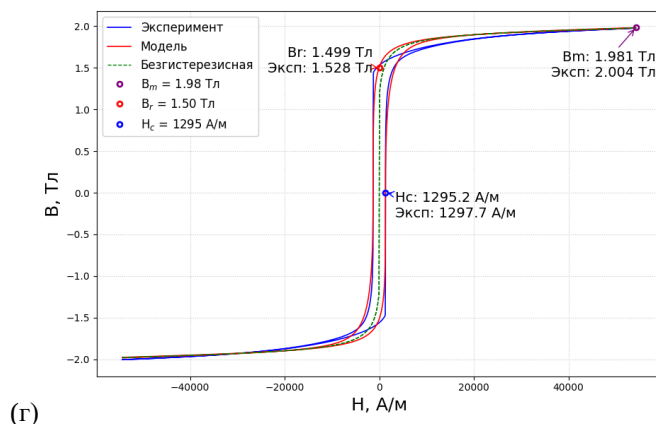
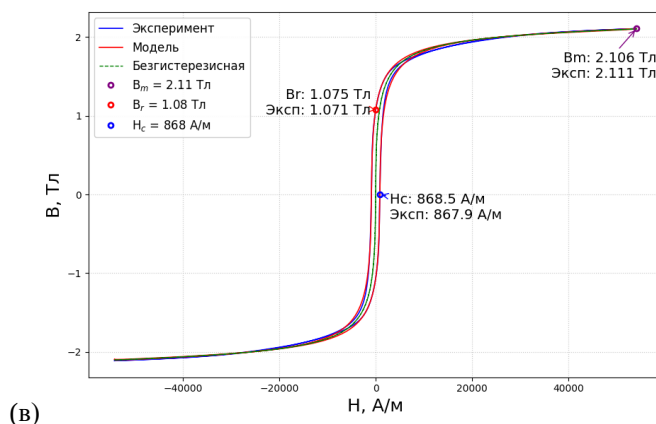
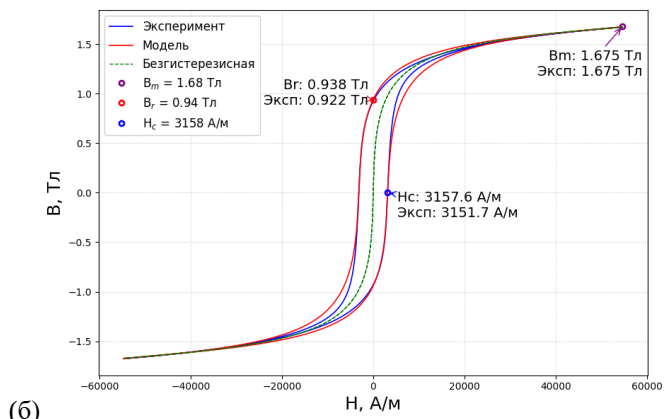
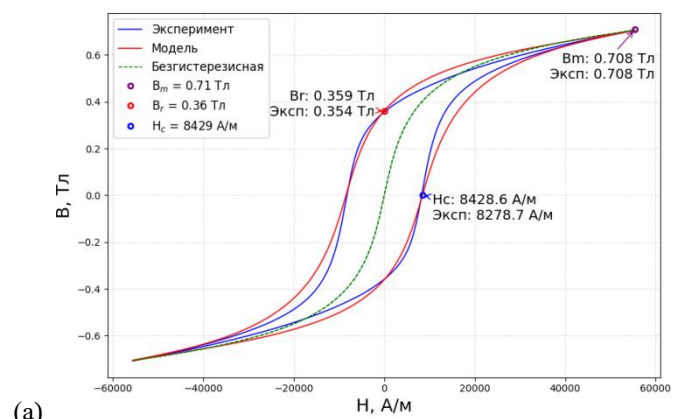


Рис. 1

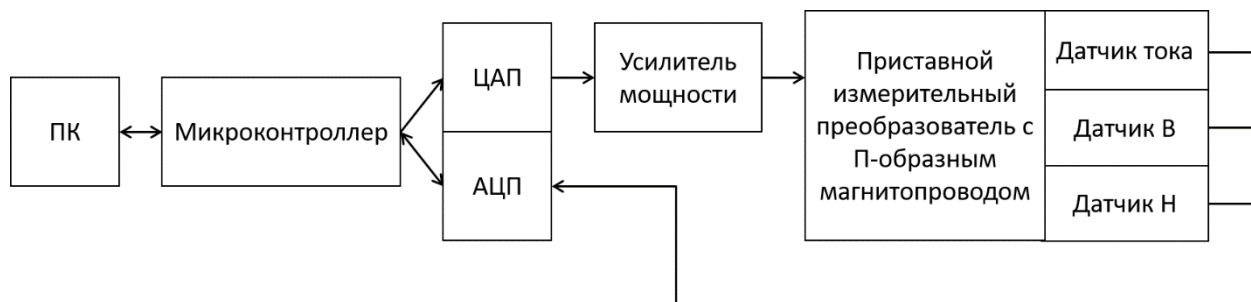


Рис. 2

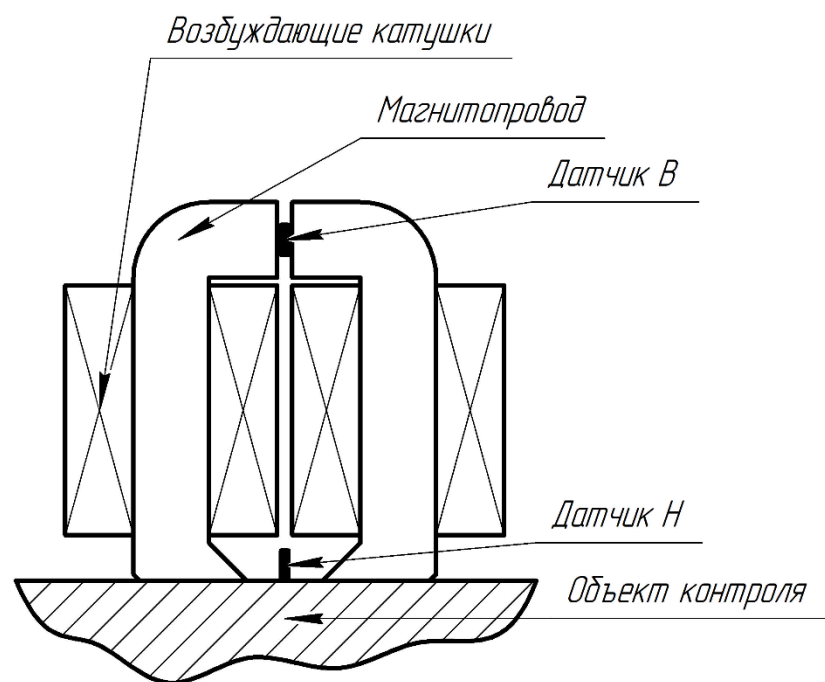
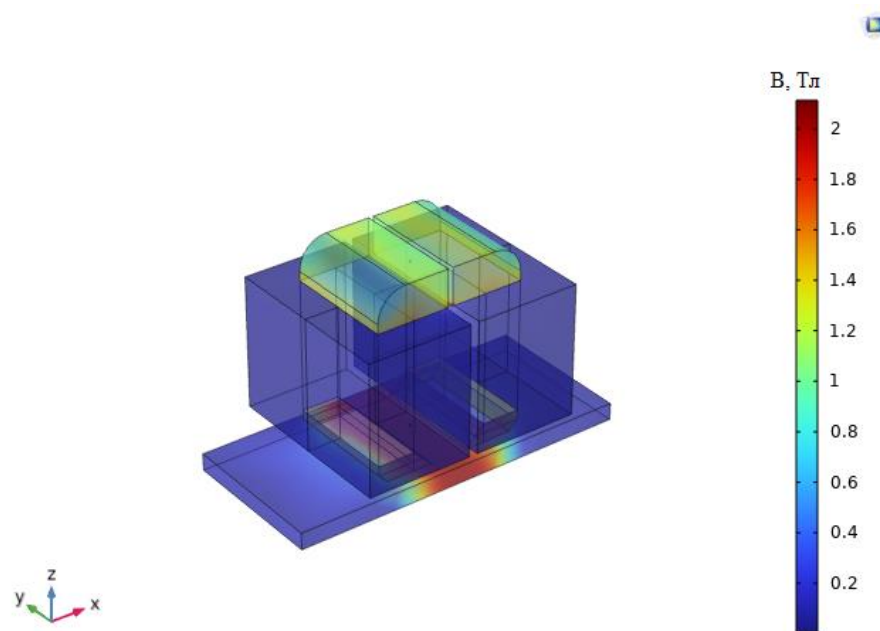
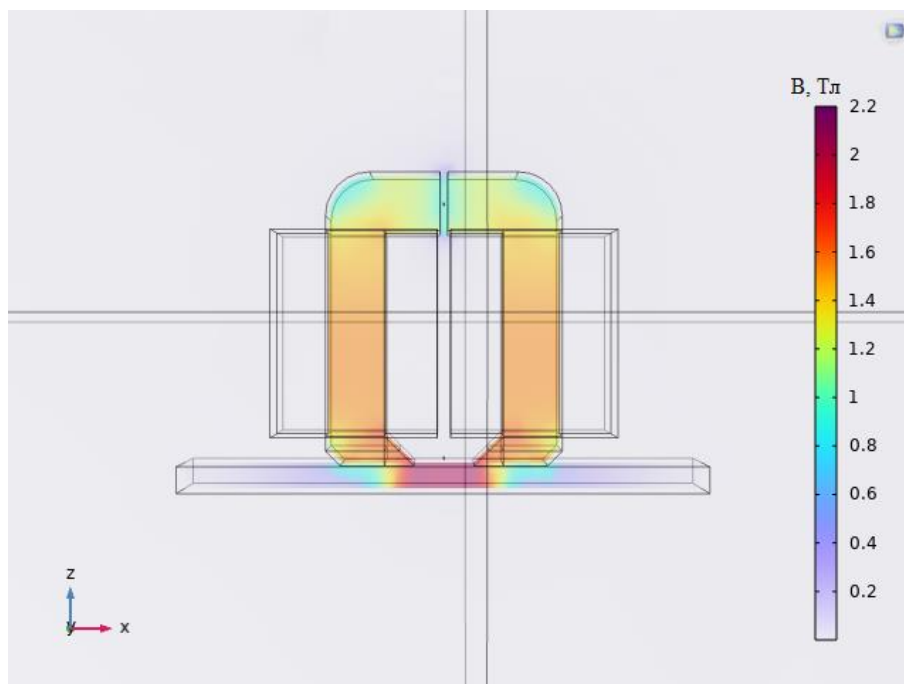


Рис. 3

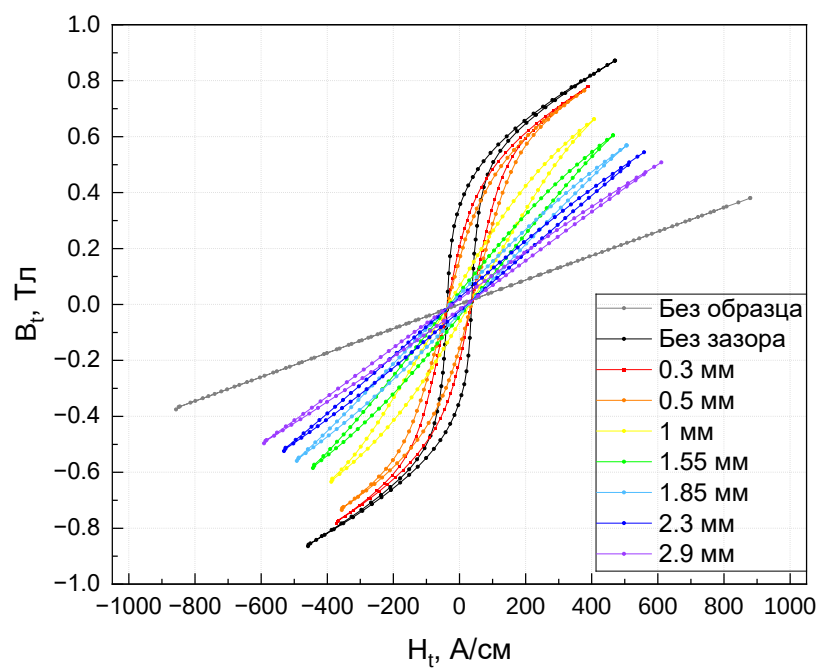


(a)

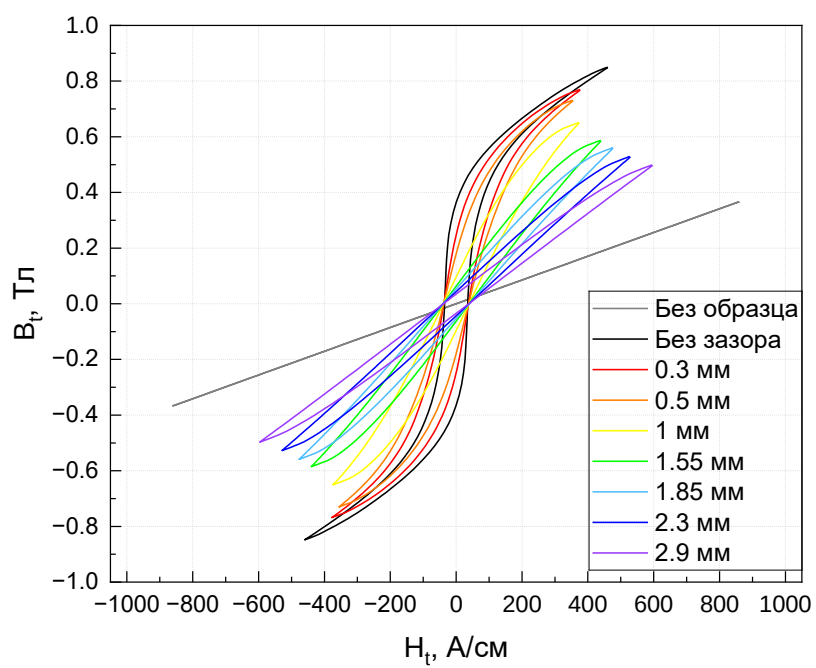


(б)

Рис. 4

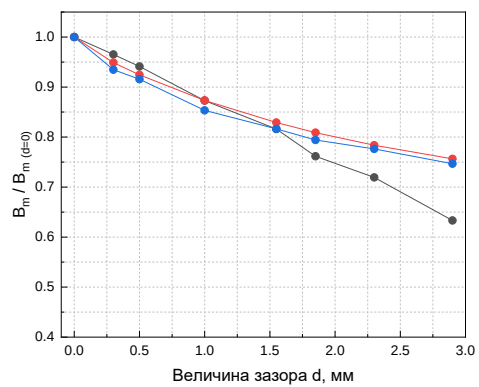


(a)

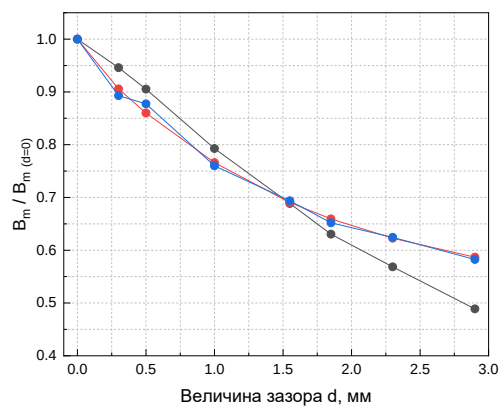


(б)

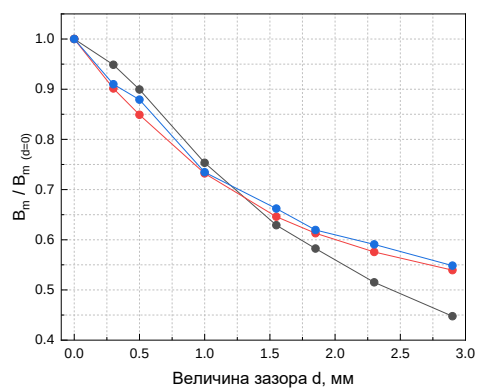
Рис. 5



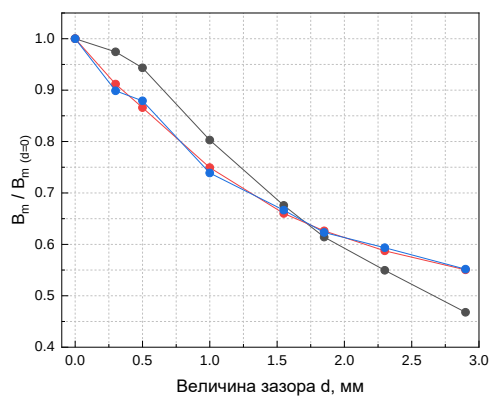
(а)



(б)

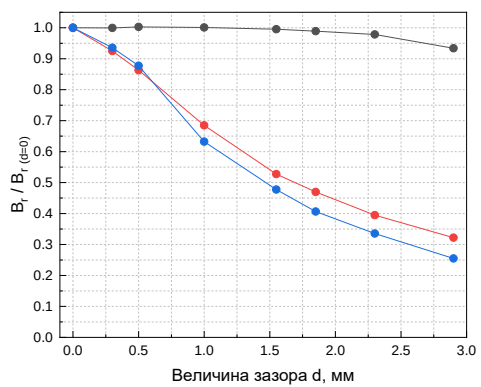


(в)

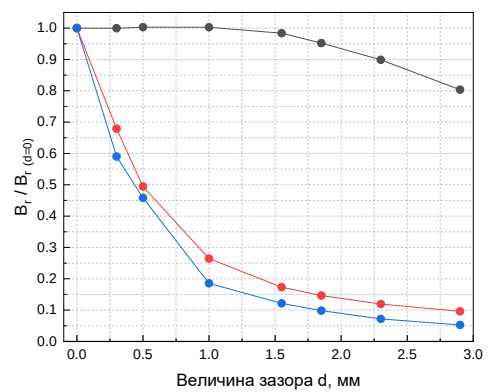


(г)

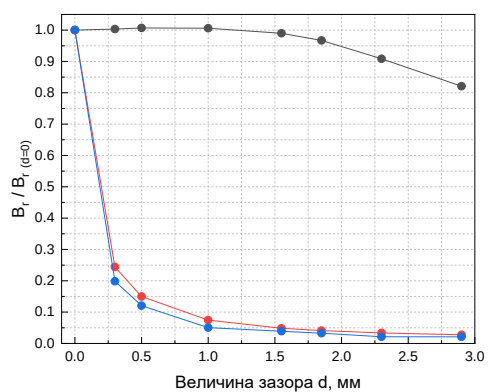
Рис. 6



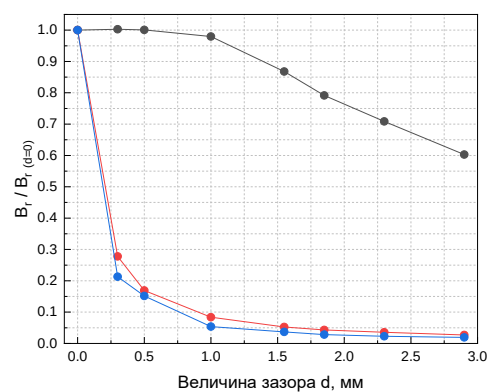
(а)



(б)

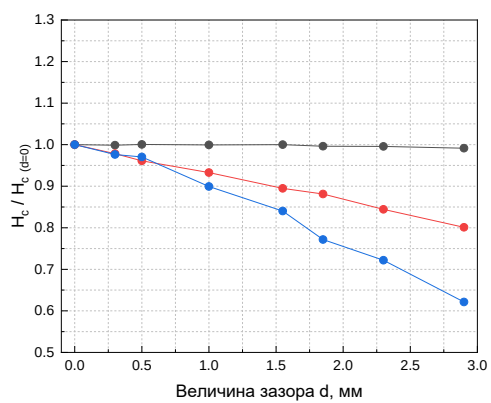


(в)

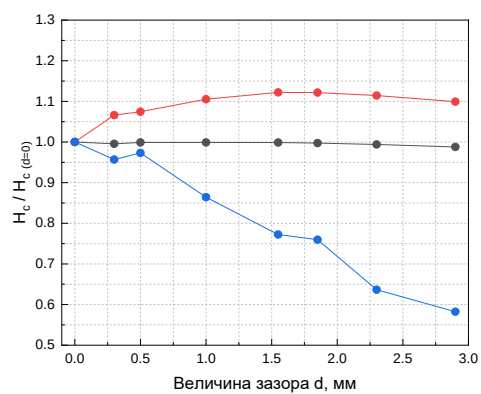


(г)

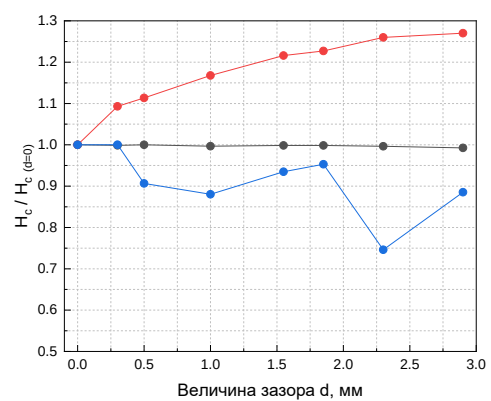
Рис. 7



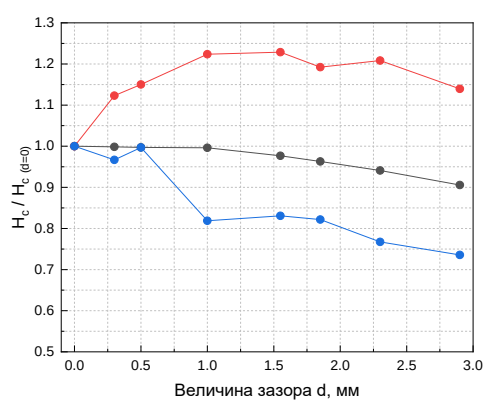
(а)



(б)

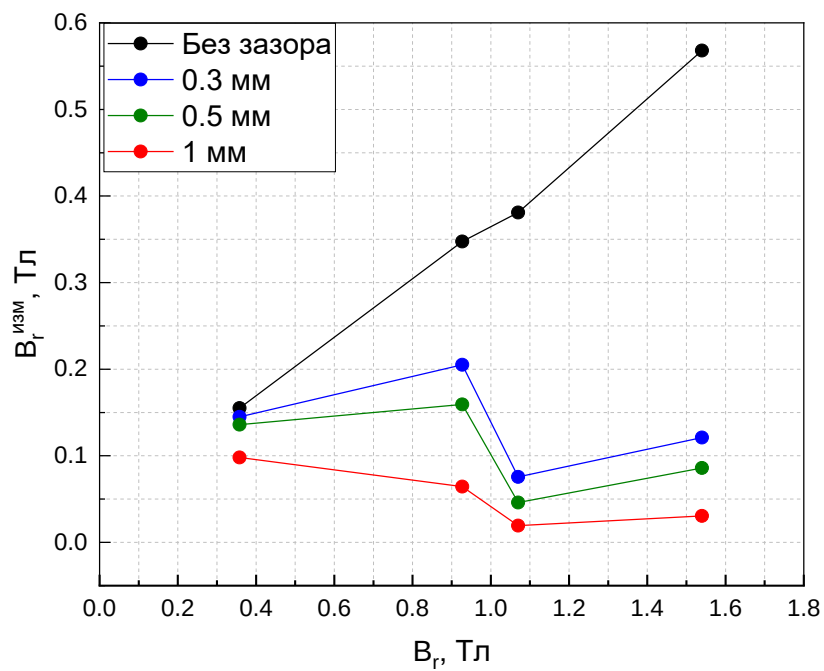


(в)

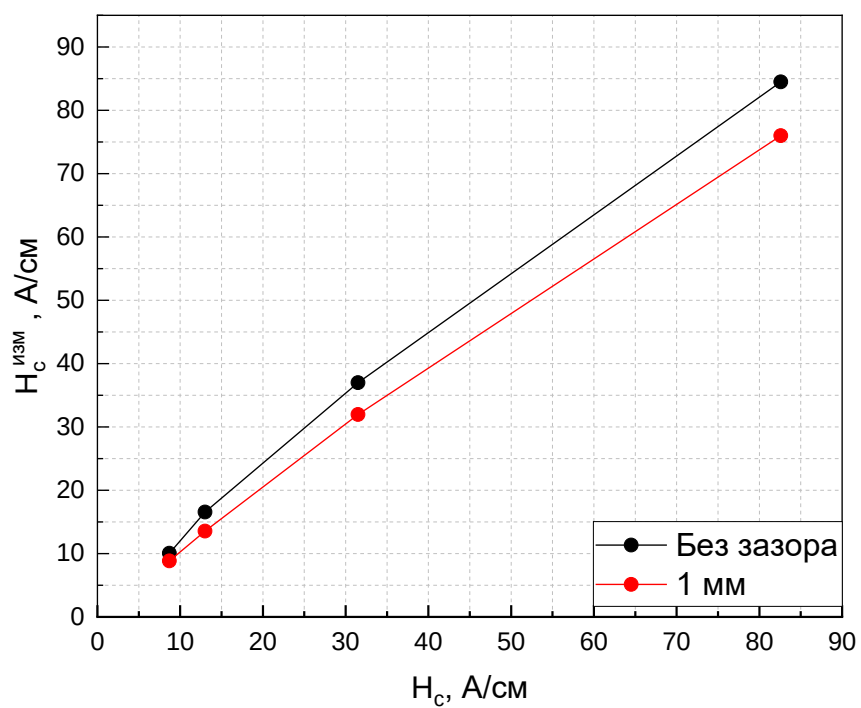


(г)

Рис. 8



(a)



(б)

Рис.9