

В-191

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

3 - 3436



Б.В. Васильев

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ
НА СПЕКТР ИМПУЛЬСОВ БАРКГАУЗЕНА
МОЛИБДЕНОВОГО ПЕРМАЛЛОЯ

1967.

3 - 3436

5275/3 чр.

Б.В. Васильев

ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ
НА СПЕКТР ИМПУЛЬСОВ БАКГАУЗЕНА
МОЛИБДЕНОВОГО ПЕРМАЛЛОЯ



1. Введение

В работах ^{/1,2,3/} обнаружено воздействие нейтронного облучения на магнитные свойства молибденового пермаллоя. Это воздействие может быть объяснено взаимодействием междоменных границ с дефектами кристаллической решетки, образующимися в результате отжига облученных образцов ^{/3/}.

Данная работа была предпринята с целью исследовать индивидуальные акты взаимодействия междоменных границ с дефектами, линейные размеры которых близки к толщине междоменной границы. Баркгаузеном было обнаружено, что при плавном, медленном изменении внешнего магнитного поля намагничивание ферромагнитного образца происходит скачкообразно. Появление скачков намагниченности обусловлено задержкой движения междоменных границ дефектами решетки.

Наиболее удобным методом исследования эффекта Баркгаузена является измерение ЭДС ($\propto \frac{d\phi}{dt}$), которая возникает в катушке, окружающей образец, при скачкообразном изменении его намагниченности. При этом площадь осциллограммы импульса, наведенного в катушке скачком намагниченности, пропорциональна изменению магнитного момента образца при скачке.

Изучение эффекта Баркгаузена ^{/4/} показало также, что наибольшее число импульсов Баркгаузена возникает при прохождении крутого участка петли гистерезиса, и что эти импульсы ответственны за необратимый вклад в изменение намагниченности.

Последние годы исследования эффекта Баркгаузена шли главным образом в двух направлениях. Частью авторов исследовались спектры импульсов Баркгаузена /4-10/, в то время как другие /11-21/ рассматривали шумы, получающиеся при наложении элементарных импульсов, т.е. рассматривали эти процессы статистически. Весьма важным является то, что в работах /12,15,19,20,22/ экспериментально доказана взаимная корреляция импульсов Баркгаузена.

Значительное количество исследований посвящено изучению распределения импульсов Баркгаузена по величине и длительности /4,10,23,24,25/. Однако большинство экспериментов, проведенных с целью определить распределение импульсов по величине, с нашей точки зрения, не свободно от одного недостатка - в них исследуется распределение импульсов по амплитуде, т.е. по величине $\frac{d\phi}{dt}$. Интерпретация полученных результатов в этом случае осложнена зависимостью $\frac{d\phi}{dt}$ не только от макроскопических свойств образца, но и от локальных характеристик той части образца, где происходит скачок, и расстояния ее до поверхности образца /4,9/.

Чтобы избежать этого, в проведенных исследованиях измерялось распределение импульсов Баркгаузена по величинам скачков магнитного потока $\Delta\phi (= \Delta M)$.

Экспериментальная установка для наблюдения эффекта Баркгаузена

Образцы для исследований и методика их приготовления описаны в работе /3/. Блок-схема установки, с помощью которой производились измерения спектров импульсов Баркгаузена в облученном молибденовом пермаллое, приведена на рис. 1. С помощью соленоида "1" создавалось магнитное поле, перемещающее образец. В положении 1 переключателя "П" намагничивающий соленоид подключался к высоковольтному источнику питания "ВИП". При этом образец "О", находящийся внутри приемной катушки "ПК", намагничивался до насыщения. Приемная катушка находилась внутри намагничивающегося соленоида в месте наибольшей однородности поля. Затем переключатель "П" переводился в положение 2, и к намагничиваемому соленоиду подключался низкочастотный

генератор пилообразных колебаний "НПК", на выходе которого поддерживалось напряжение той же полярности, что и на выходе высоковольтного источника питания. Намагничивающий соленоид имел 10^5 витков и индуктивность $L \approx 100$ гн. Поэтому ток в соленоиде не уменьшался до нуля в момент переброса переключателя "П" из положения 1 и 2, и напряжение на соленоиде плавно спадало до величины, равной напряжению на выходе низкочастотного генератора.

Низкочастотный генератор позволял получать напряжение треугольного вида с частотами в диапазоне от 0,001 до 100 гц и амплитудой до 100 в. Благодаря этому можно было выбирать скорость изменения поля в широких пределах. Напряжение, индуцируемое в приемной катушке скачками Баркгаузена, усиливалось широкополосными усилителями "ПУ" и "ШУ", интегрировалось с помощью интегрирующего усилителя "И", и далее импульсы сортировались по величинам амплитудным дискриминатором "АД" и пересчетным устройством "ПС".

После дискриминатора импульсы могли быть поданы также на измеритель скорости счёта "ИСС", с выхода которого напряжение поступало на развертку оси "У" двухкоординатного самописца "ПДС", в то время как на его развертку по оси "Х" подавалось напряжение, питавшее намагничивающий соленоид. Для визуального наблюдения импульсного напряжения к выходу усилительного тракта был подключен катодный осциллограф.

Приемная катушка была изготовлена так, чтобы ее параметры удовлетворяли условиям наименьшего искажения индуцированного напряжения и наибольшей чувствительности /24,27/. Катушка имела 2000 витков, намотанных на 1,6 - миллиметровый каркас, при длине намотки 22 мм. Катушка была намотана медным проводом диаметром 0,05 мм. Постоянная времени катушки $\tau \approx 6$ мксек. Постоянная намагничивающей катушки $\tau = 5 \frac{\text{эрс}}{\text{ма}}$. Намагничивающий ток контролировался прибором первого класса.

Полоса пропускания усилительного тракта определялась следующим образом: к выходу усилителя подключался анализатор спектра. При перемагничивании образца на экране анализатора наблюдался спектр шума усилителя и спектр импульсов Баркгаузена. Полоса пропускания усилителя регулировалась так, чтобы проходили все гармоники импульсов Баркгаузена, которые наблюдались на экране анализатора спектра, и была выбрана в интервале примерно от 2 до 50 кГц.

Интегрирующий усилитель был собран по схеме, в основном совпадающей со схемой, описанной в ^{1/28/}. Принцип действия интегрирующего усилителя заключался в следующем: импульс Баркгаузена, поданный на вход интегрирующего усилителя, усиливается и с помощью триггерного устройства преобразуется в прямоугольный импульс постоянной амплитуды и длительности, равной длительности импульса Баркгаузена. С помощью этого прямоугольного импульса запирается лампа, шунтирующая интегрирующую цепочку. На вход последней подается напряжение, пропорциональное амплитуде импульса Баркгаузена. С помощью специальной схемы напряжение на интегрирующей цепочке после окончания импульса Баркгаузена за время порядка 0,1 мксек закорачивается на землю. Таким образом, на выходе интегрирующей цепочки треугольный импульс имеет длительность, равную длительности импульса Баркгаузена, и наклон, пропорциональный его амплитуде, т.е. максимальное напряжение импульса на выходе пропорционально площади под импульсом ЭДС, наведенным в катушке ($\approx \Delta M$). Отклонения от линейности процесса интегрирования в пределах измерения (от 3 до 300 мксек и от 1 в до 1⁰⁰ в) не превышали 5%.

Мертвое время интегратора было равно времени спада напряжения на интегрирующей цепочке и не превышало 0,1 мксек, что является вполне удовлетворительным, так как средний интервал между импульсами был приблизительно равен 6 мксек.

Амплитудный дискриминатор представлял собой стандартную схему и калибровался по стандартной методике. Ошибки, вносимые дискриминатором, не превышали одного процента от измеряемой величины.

В качестве пересчетного прибора использовался ПСТ-100, максимальная скорость счёта которого была равна $2 \cdot 10^5$ имп/сек. Измеритель скорости счёта (ИСС-3) мог работать в режимах с различными постоянными времени интегрирования (от 0,1 до 10 сек). Обычно запись спектров Баркгаузена проводилась при постоянной времени интегрирования равной 1 сек. Ошибка, вносимая "ИСС", равнялась 1% от полной шкалы прибора.

Установка градуировалась следующим образом. Вместо образца внутрь приемной катушки помещалась калибровочная катушка с известным диаметром намотки и числом витков. На нее через включенное последовательно сопротивление R подавалось импульсное напряжение прямоугольной формы, задний фронт которого мог изменяться в нужных пределах.

Зная величину дополнительного сопротивления R и величину реактивного сопротивления градуировочной катушки, а также величину напряжения прямоугольного импульса, легко вычислить ток через градуировочную катушку, а, следовательно, и величину скачка магнитного потока, являющегося импульс Баркгаузена.

Фиксация величины импульса на выходе производилась на половине счёта пересчётных устройств. Ошибка в градуировке установки при различных длительностях градуировочных импульсов не превышала 15%.

Предварительные исследования эффекта Баркгаузена

Для получения ответа на некоторые методические вопросы были проведены предварительные исследования эффекта Баркгаузена.

Распределение импульсов Баркгаузена по длительности

Для уточнения спектральных характеристик импульсов Баркгаузена в молибденовом пермаллое была измерена зависимость количества импульсов Баркгаузена от их длительности. Эта зависимость была снята с помощью описанного выше интегрирующего усилителя, на интегрирующую цепочку которого в этом случае подавалось постоянное напряжение и, таким образом, максимальное напряжение треугольных импульсов на выходе усилителя было пропорционально длительности импульсов Баркгаузена. Измерение распределения импульсов по длительности показало, что полоса пропускания усилительного тракта выбрана правильно. Полученное распределение имело вид, подобный приведенному авторами /29/.

Влияние скорости изменения внешнего поля на эффект Баркгаузена

Влияние скорости изменения внешнего поля на эффект Баркгаузена обсуждалось ранее в работах /7,26/, где было показано, что полное число импульсов Баркгаузена уменьшается с увеличением скорости изменения внешнего поля.

Как показано в работе /26/, число импульсов Баркгаузена должно сопоставляться со скоростью изменения внутреннего поля; при этом скорость изменения внутреннего поля может быть различной при одинаковой скорости изменения внешнего поля, так как следует учитывать зависимость внутреннего поля от размагничивающего фактора образца, а именно:

$$\frac{dH_i}{dt} = \frac{dH_0}{dt} \frac{1}{1 + N \chi},$$

где H_i - внутреннее поле,
 H_0 - внешнее магнитное поле,
 χ - магнитная восприимчивость,
 N - размагничивающий фактор.

(В связи с этим нет надобности исследовать зависимость эффекта Баркгаузена от формы образца).

Из общих соображений следует, что влияние скорости изменения поля сводится к следующему. Во-первых, с увеличением скорости уменьшается интервал между отдельными импульсами и, следовательно, увеличивается вероятность просчёта импульсов пересчётным прибором. Этот механизм является определяющим в том случае, когда импульсов много, а пересчётное устройство имеет большое "мертвое" время. Во-вторых, определенное влияние на спектр импульсов Баркгаузена может иметь ЭДС, появляющаяся в приемной катушке за счёт $\frac{dH_0}{dt}$, но этим эффектом при не очень высоких частотах перемагничивания ($T > 1$ сек) можно пренебречь.

В-третьих, при большой скорости изменения поля импульсы могут перекрываться друг другом. Это тоже ведет к уменьшению общего числа импульсов, но такое может случиться лишь при очень больших скоростях изменения поля.

Существует еще "кажущееся" изменение числа импульсов при изменении скорости протягивания поля. Обычно на пороге чувствительности установки просчитывается небольшое количество импульсов, вызванных тепловыми флуктуациями. Естественно, их число пропорционально времени счёта или обратно пропорционально скорости изменения поля. Считая общее число импульсов N не зависящим от скорости (при малых скоростях изменений поля), получим

$$N = N_0 + \frac{\text{const}}{f} \frac{dH_0}{dt}$$

Нами была измерена зависимость общего числа импульсов от скорости изменения поля. На рис. 2 показана зависимость числа импульсов от обратной частоты перемагничивания (для частоты 0,001 гц скорость изменения внешнего поля приблизительно равна 0,04 э/сек, размагничивающий фактор образцов $\approx 10^{-5}$). Из рис. 2 видно, что зависимость числа импульсов N линейна относительно f^{-1} , что подтверждает вышеприведенные рассуждения. Количество импульсов Баркгаузена, измеряемых несколько выше уровня шумов, очень мало меняется с изменением скорости протягивания поля.

Следовательно, для достаточно малой скорости изменения внутреннего поля (порядка 0,1 эрс/сек) и при не очень большом числе импульсов Баркгаузена в единицу времени ($\approx 5 \cdot 10^4$ имп/сек) главным ограничением для повышения скорости изменения поля является предельная разрешающая способность установки. Этим и определялась скорость изменения внешнего поля в нашем эксперименте.

Вопрос о тепловых шумах, ограничивающих чувствительность усилителей в установках по изучению эффекта Баркгаузена, рассматривался в работах /4,24/.

Произведенные нами оценки показали, что в нашем случае неустранимая с помощью экранов часть помех может быть отнесена за счёт флуктуаций тока в приемной катушке. ЭДС этих шумов по величине сравнима с уровнем шума нашей установки и изменяется при изменении поля так же, как изменяется обратимая восприимчивость.

Эффект Баркгаузена в облученных образцах

Типичные кривые для облученных образцов молибденового пермаллоя, показывающие изменение количества импульсов Баркгаузена различной величины в ходе изохронного отжига, изображены на рис. 3.

В контрольных необлученных образцах изменения количества импульсов Баркгаузена в ходе изохронного отжига обнаружено не было. Полученные результаты, на наш взгляд, подтверждают предложенный ранее /3/ механизм воздействия нейтронного облучения на магнитные свойства ферромагнетиков, т.к. кривые, описывающие изменение числа импульсов Баркгаузена (рис.3), и кривые, описывающие изменение коэрцитивной силы /3/ в облученном молибденовом пермаллоде, можно считать подобными, если не принимать во внимание некоторые детали.

Распределения импульсов Баркгаузена по величинам ΔM , измеренным после отжига при различных температурах, показаны на рис.4. В некотором приближении полученные распределения могут быть описаны формулой:

$$N = \left(\frac{1}{\Delta M} \right)^2. \quad (1)$$

Расчеты, проведенные в работе /30/, позволяют связать величину импульса Баркгаузена с величиной дефекта решетки, наличием которого обусловлен импульс.

Действительно, в том случае, когда среднее расстояние между дефектами равно R , поверхность границы, связанная с одним дефектом, примерно равна R^2 , а перемещение границы за один скачок также равно R , величина объема, ориентация намагниченности которого изменяется скачком, равна лишь части величины R^3 , т.к. другая часть этого объема перемагничивается обратимым путем (грубые оценки показывают, что объем, перемагничивающийся одним скачком, $\Delta v = \frac{R^3}{3}$).

Предполагая $\Delta v = R^3$, нетрудно выразить величину скачка через размер дефекта, на котором произошла задержка движения границы.

Т.к. $2J_s H_{kp} \Delta v = W$
(W — энергия взаимодействия междоменной границы с дефектом, K — критическое поле).

Согласно /31/,

$$\frac{W}{H_{kp}} = \frac{6 J_s a \rho^2}{\sqrt{\frac{2K}{r} \left(\frac{3}{4\pi} \right)^{2/3} a^{2/3}}}.$$

Здесь J_s — намагниченность насыщения, K — константа анизотропии,

E — энергия размагничивания материала, a — межатомное расстояние,
 ρ — радиус дефекта, α — объемная концентрация дефектов.

Т.е.

$$\Delta M \approx \rho^2. \quad (2)$$

Однако получаемое отсюда (с использованием (1)) распределение дефектов по размерам:

$$N = \left(\frac{1}{\rho} \right)^4 \quad (3)$$

нельзя считать истинным.

Искажение происходит в силу того, что в достаточно большом внешнем магнитном поле междоменная граница, сорвавшаяся с крупного дефекта, при своем движении уже не задерживается на малых дефектах, на которых она задерживалась в слабом поле. Таким образом, получается увеличение статистического веса больших дефектов.

Как видно из рис. 4, формулу (1), вероятно, можно считать одинаково справедливой как для спектра импульсов Баркгаузена, определенного в образце до облучения, так и в облученном образце в течение изохронного отжига и после него. Это является указанием на то, что распределение дефектов решетки по величинам при этих условиях заметно не изменяется.

На рис.5 изображена серия характерных кривых, показывающих изменение полного числа импульсов Баркгаузена, приходящихся на единичный интервал поля, в зависимости от величины приложенного поля для образца, облученного потоком быстрых нейтронов (10^{17} н/см²) и отожженного при различных температурах. Несимметричность полученных кривых относительно нуля поля, к сожалению, до сих пор не нашла у нас убедительного объяснения.

Обнаруженное на большом количестве образцов появление минимума числа импульсов Баркгаузена вблизи нуля внешнего поля может быть объяснено влиянием междоменных границ на процесс коагуляции точечных дефектов. Действительно, наличие междоменной границы через механизм магнитострикции приводит к появлению в кристалле внутренних напряжений, которые облегчают конденсацию дефектов /3/ .

Проведенные исследования позволяют считать обнаруженные ранее большие скачки намагниченности в облученном молибденовом пермаллоиде /2/ большими

скачками Баркгаузена, так как распределение больших скачков намагниченности по величинам с точностью до ошибки совпадает с продолженным в область больших ΔM распределением импульсов Баркгаузена для отожженного образца, показанным на рис. 4.

Л и т е р а т у р а

1. Schindler A.J., R.H.Kelnochan, J.Weertman J.Appl. Phys 35, 2640 (1960).
2. Васильев Б.В., Горелов А.П. Письма в редакцию ЖЭТФ, 4, 413 (1966).
3. Васильев Б.В. Препринт ОИЯИ 2 3-3418, Дубна, 1967.
4. Tebble. R.S., Skidmore J.C., Corner W.D. Proc. Phys. Soc. 63, 7, 367 A, 739 (1950).
5. Tebble R.S., Newhouse V.L., Proc. Phys. Soc. 66 B, 633 (1953).
6. Tebble R.S. Proc. Phys. Soc. 68, 12, 432 B, 1017 (1955).
7. Бозорт Р. "Ферромагнетизм", ИИЛ, Москва, стр. 420, В, 1017 (1955)
8. Родичев А.М., Игнатченко В.А., ФММ, 9, вып. 6, 903 (1960).
9. Поливанов К.М., Родичев А.М., Игнатченко В.А., ФММ, 9, вып. 5, 778 (1960).
10. Sawada H., J.Phys. Soc. Japan 7, 575 (1952).
11. Krumhanst J.A., Beyer R.T., J.Appl. Phys 29, 582 (1949).
12. Грачёв А.А., ДАН СССР, 71, № 2, 269 (1950).
13. Грачёв А.А., ДАН СССР, 85, 4, 741 (1952).
14. Haneman D. J.Appl. Phys. 26, 355 (1955).
15. Biorci G., Pescetti D., J.Appl.Phys. 28, 777 (1957).
16. Бункин Ф.В., ЖТФ, 26, 1782 (1956).
17. Mazzetti P., Nuovo Cim., 25, 1322 (1962).
18. Mazzetti P., Montalenti G. J.Appl. Phys. 34, B 223 (1963).
19. Mazzetti P., Montalenti G., J. Appl. Phys. 34, B 223 (1963).
20. Lutgemeier H. Z. angew Phys. 16, 157, 153 (1963).
21. Mazzetti P., Montalenti G. Proc. Internat. Conf. Magnetism., Nottingham, 1964, 701-706.
22. Bittel H., Westerboer J., Ann.Phys. 4, 203 (1959).

23. Родичев А.М., Саланский Н.М., Синегубов В.Н., Изв. СО АН СССР, 3, 123 (1960)
24. Ивлев В.Ф., Рудяк В.М., ст. в сб. "Магнитная структура ферромагнетиков" (Материалы всесоюзного совещания) Издат, СО АН СССР, Новосибирск, 1960, стр. 101.
25. Игнатченко В.А., Родичев А.М., там же, стр. 132.
26. Родичев А.М., там же, стр. 135
27. Родичев А.М., Игнатченко В.А., Саланский Н.М., там же, стр. 113.
28. Родичев А.М., Саланский Н.М., Синегубов В.Н., Изв. СО АН СССР №3, 123 (1960)
29. Н.М.Саланский, А.М.Родичев. Изв. АН СССР, сер. физ., 161 (1964)
30. L. Neel. Cahiers de Phys № 25, 21 (1944) Имеется перевод в сб. "Физика ферромагнитных областей, ИЛ, 1953.
31. Гегузин Я.Е. "Макроскопические дефекты в кристаллах" Металлургияиздат, М., 1962.

Рукопись поступила в издательский отдел
14 июля 1967 года.

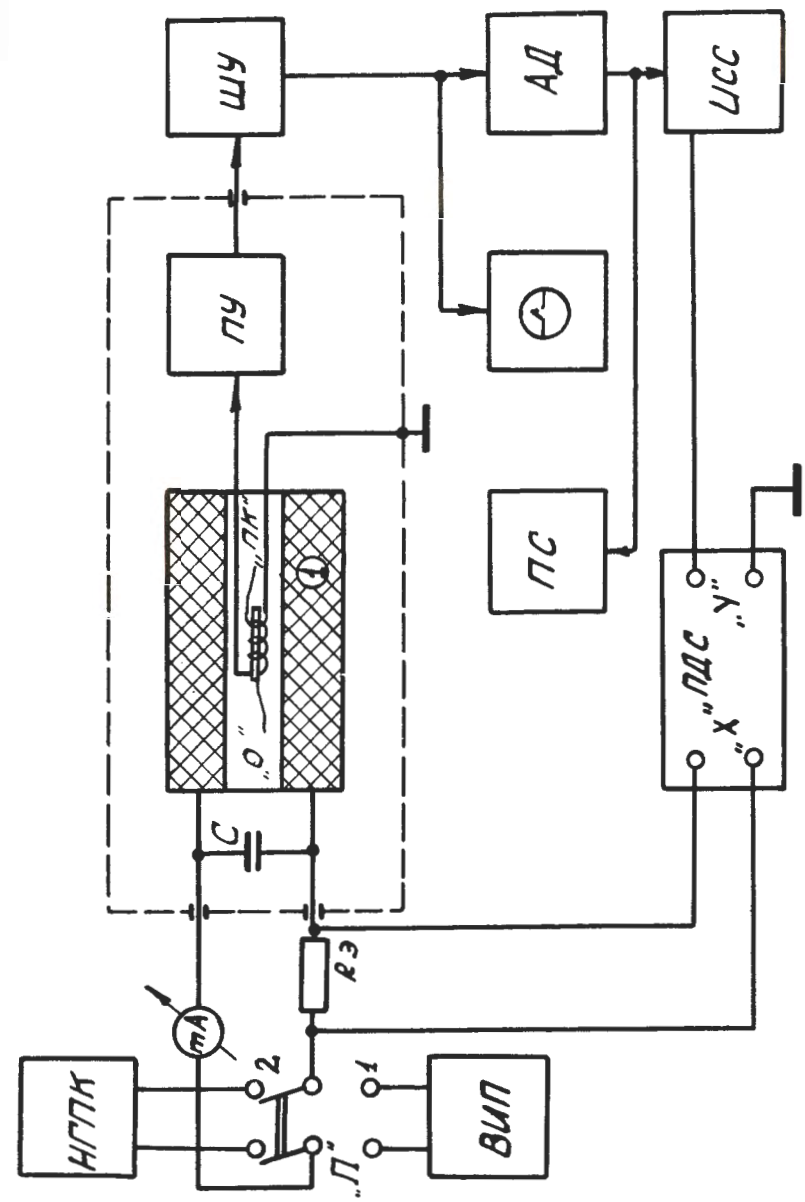


Рис. 1.

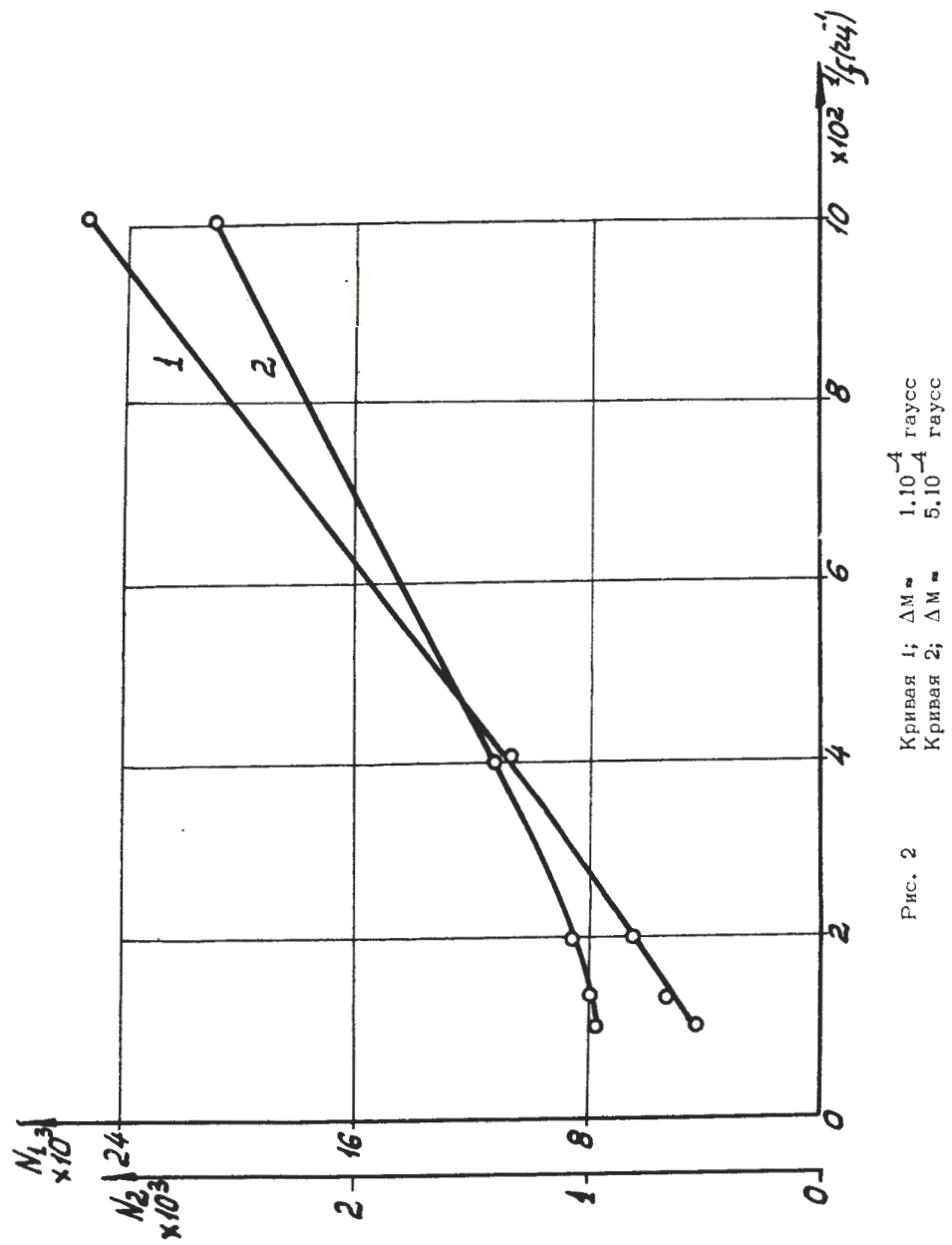


Рис. 2

Кривая 1; $\Delta M = 1.10^{-4}$ гаусс
Кривая 2; $\Delta M = 5.10^{-4}$ гаусс

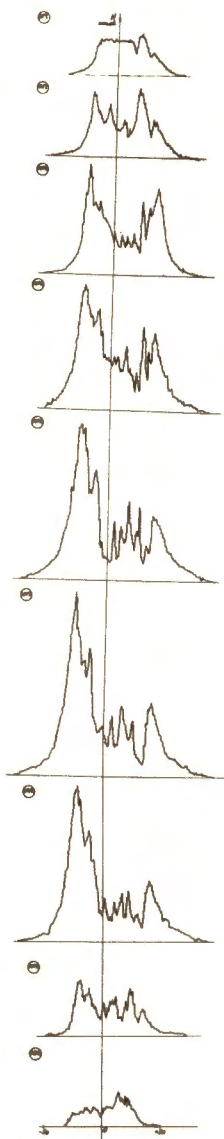


Рис .5.