АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том VI 1960 Вып. 3

МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЕ ФЕРРИТЫ КАК МАТЕРИАЛ ДЛЯ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

И. П. Голямина

Описываются механические, магнитные и магнитострикционные свойства четырех типов ферритов, предназначенных для целей электроакустического преобразования. Показано, что существенные для преобразования магнитострикционные параметры этих материалов сравнимы по величине с соответствующими параметрами обычно применяемых магнитострикционных металлов. Приводится зависимость свойств ферритов от величины постоянного магнитного поля и от температуры.

В 1951 г. Н. Н. Андреевым было высказано предположение о возможности применения ферритов в качестве материала для магнитострикционных электроакустических преобразователей. Возможность замены металлических магнитострикционных материалов (таких, как никель, пермендюр и тому подобные) ферритами представлялась чрезвычайно перспективной: ввиду практического отсутствия в ферритах потерь на токи Фуко при этом становилось возможным применение монолитных сердечников, исключался трудоемкий процесс расслоения материала на тонкие пластины; диапазон применения магнитострикционных преобразователей расширялся в сторону высоких частот; коэффициент их полезного действия возрастал. Немаловажным обстоятельством в условиях растущего применения ультразвука в науке и технике является также сравнительная дешевизна изготовления ферритов и недефицитность исходного сырья.

В соответствии с поставленной Н. Н. Андреевым задачей в его лаборатории в Акустическом институте АН СССР с 1954 г. начались работы по исследованию ферритов для целей электроакустического преобразования, включающие измерения параметров материала, изыскание химических составов и технологии изготовления магнитострикционных ферритов, а также испытание свойств опытных преобразователей. Некоторые результаты этих работ были опубликованы (см. [2], [4], [7—9], [12—13], [15], [18])*. В списке литературы даны также иностранные работы, посвященные вопросам применения ферритов для целей акустики (см. [1], [3], [5—6], [10—11], [14], [16—17]), среди которых надо особенно отметить фундаментальные исследования Ван дер Бургта.

В данной работе приводятся свойства некоторых разработанных в лаборатории Н. Н. Андреева ферритов, которые могут быть рекомендованы в качестве материала для изготовления магнитострикционных электроакустических преобразователей.

Пригодность магнитострикционного материала для целей электроакустического преобразования определяется величиной его параметров, которые влияют на такие важные свойства преобразователей, как чувствительность в режиме излучения и приема, коэффициент полезного действия, коэффициент отдачи, предельная интенсивность излучаемого звука; при этом стабильностью параметров материала в основном определяется и

* Работы по исследованиям ферритов для акустических целей даны в списке литературы в хронологическом порядке.

стабильность свойств преобразователей при изменении температуры среды или амплитуды возбуждающего поля.

Связь свойств преобразователей с параметрами материала может быть получена из расчетов магнитострикционных преобразователей, приведенных, например, в работах [19—21], а также ряде других работ. Такие расчеты обычно проводятся в предположении линейной связи между величинами H, B, σ и ε, где B, σ, ε представляют собой амплитуды переменной индукции, механического напряжения и деформации, возникающие в результате наложения переменного магнитного поля с амплитудой H, меньшей величины постоянного поля подмагничивания H_0. Магнитное насыщение нарушает линейный характер этой связи, поэтому для неизменности свойств преобразователя с увеличением амплитуды переменного поля желательно, чтобы величина индукции насыщения и магнитострикции насыщения λ_s была бы достаточно большой. Величина λ_s является одним из факторов, определяющих предельную мощность излучателей. С другой стороны, предельная мощность определяется механической прочностью материала, характеризуемой максимально допустимым механическим напряжением.

Существенную роль для преобразования играет коэффициент магнитомеханической связи k, определяющий отношение механической энергии к энергии магнитного поля при работе преобразователя в режиме излучения на частотах, лежащих ниже механического резонанса с условием пренебрежения потерями.

Электроакустический коэффициент полезного действия излучателей $\eta_{эа}$ можно выразить как

$$\eta_{эа} = \eta_{эм} \cdot \eta_{ма}, \tag{1}$$

где $\eta_{эм}$ — электромеханический к. п. д., $\eta_{ма}$ — механико-акустический к. п. д. Величина $\eta_{ма}$ при заданной акустической нагрузке определяется механическими потерями материала преобразователя или, иначе говоря, его механической добротностью. Величина $\eta_{эм}$ на частоте резонанса на основании формул работ [20—21] может быть выражена следующим образом:

$$\eta_{эм} = \frac{1}{1 + \dfrac{R_{ak}\rho_{п}q_1}{\lambda^2\eta_{ма}}}, \tag{2}$$

где R_{ak} — сопротивление нагрузки, q_1 — величина, зависящая от геометрических характеристик преобразователя, λ — магнитострикционная постоянная, равная $(\sigma/B)_\varepsilon$, где ε означает условие отсутствия деформации, $\rho_п$ — коэффициент электрических потерь в материале (мощность потерь определяется как $\rho\int\limits_v B^2 dv$, где v — объем, омические потери в обмотке не учитываются). Величина $\rho_п$ может быть представлена как

$$\rho_п = \rho_г + \rho_ф, \tag{3}$$

где $\rho_г$ — коэффициент потерь на гистерезис, $\rho_ф$ — коэффициент потерь на токи Фуко. $\rho_ф$ определяется формулой (см. [22])

$$\rho_ф = \frac{\pi^2 f^2 d^2}{6r}, \tag{4}$$

где f — частота, d — толщина слоя материала, r — его удельное электрическое сопротивление; $\rho_г$ может быть косвенно охарактеризован величиной коэрцитивной силы H_c.

Из формул (1) и (2) следует, что $\eta_{эа}$ магнитострикционного излучателя тем больше, чем больше величина λ и r материала, его механическая добротность и чем меньше в нем потери на гистерезис. Величина $\cos\psi$, влияющая на коэффициент отдачи преобразователя (см. [23]) при условии высокого значения $\eta_{эм}$, может быть приближенно определена как

$$\cos\psi \approx \frac{1}{\sqrt{1+\frac{R_{ak} f^2 q_1}{4\lambda^4\mu^2\eta_{ма}}}}, \tag{5}$$

т. е. будет тем ближе к единице, чем больше при заданной геометрии излучателя и его механической нагрузке величина $(\lambda^2\mu)^2$ (где μ — магнитная проницаемость материала).

Чувствительность излучателя по напряжению, т. е. отношение звукового давления p на его оси к величине электрического напряжения V на резонансной частоте определяется выражением:

$$\frac{p}{V} = q_2 \frac{\lambda}{fn} \eta_{ма}, \tag{6}$$

где n — число витков обмотки преобразователя, q_2 — величина, определяемая его геометрическими параметрами и скоростью звука в материале.

Из формулы (6) следует, что для величины чувствительности преобразователя в режиме излучения решающее значение также имеет параметр материала λ.

Чувствительность приемников определяется как отношение электрического напряжения в их обмотке V при условии нагрузки на бесконечное сопротивление к величине внешнего звукового давления p.

Выражения для V/p из работы [21] могут быть представлены следующим образом: на частотах ниже механического резонанса

$$\frac{V}{p} = \frac{\lambda\mu_\varepsilon}{E_H} n f q_3, \tag{7}$$

на частоте резонанса

$$\frac{V}{p} = \frac{\lambda\mu_\varepsilon}{R_{ak}} n \eta_{ма} q_4. \tag{8}$$

Здесь q_3 и q_4 — величины, определяемые геометрическими параметрами преобразователя и скоростью звука в материале, μ_ε — магнитная проницаемость материала при условии отсутствия деформации, E_H — модуль Юнга при условии неизменности величины H.

Из зависимости между параметрами материала следует, что

$$\frac{\lambda\mu_\varepsilon}{E_H} = \frac{\Lambda}{4\pi}, \tag{9}$$

где $\Lambda = (B/\sigma)_H$ — так называемая магнитострикционная постоянная чувствительности. Таким образом, чувствительность приемников на низких частотах определяется константой материала Λ, а на резонансе — $\Lambda \cdot E_H$.

На основании приведенных рассуждений о связи свойств преобразователей и параметров материала, при исследовании ферритов как материала для преобразователей, производились измерения величин λ_S, k, λ, Λ, r, H_c, μ, а также механической добротности и механической прочности. Для возможности расчета резонансной частоты преобразователей любой формы определялась также плотность d, скорость звука c, модуль Юнга E и коэффициент Пуассона σ_p.

Величины k, μ, λ и Λ определялись при различных значениях H_0 и при остаточном намагничении.

Для измерения μ, k, H_c образцами служили кольца из исследуемого материала со средним диаметром около 7,6 *см* и сечением $0{,}8\times0{,}8$ *см*, для измерения λ_S и σ_p — стержни длиной 5 *см* и диаметром 0,5 *см*; d, c и E измерялись на образцах обеих конфигураций.

Величина d определялась методом гидростатического взвешивания, c, E_H и σ_p — резонансным методом (см. [24]), H_c — по петле гистерезиса, снятой баллистическим методом, λ_S — при помощи интерференционного микроскопа (см. [25]), μ_σ — по измеренной на низких частотах индуктивности катушки, намотанной на исследуемый образец. Величина k вычислялась по частотам резонанса f_r и антирезонанса f_a, определяемым по частотной характеристике модуля электрического импеданца образца:

$$k^2 = 2\frac{f_a - f_r}{f_a}. \tag{10}$$

По этой же характеристике определялась и механическая добротность. Величины λ и Λ вычислялись по измеренным значениям k, E_H и μ_σ при помощи формул:

$$\lambda = \frac{k}{1-k^2}\sqrt{\frac{E_H}{4\pi\mu_\sigma}}, \tag{11}$$

$$\Lambda = \frac{k^2}{(1-k^2)\,\lambda}. \tag{12}$$

Механическая прочность оценивалась по величине предельно допустимых механических напряжений σ_{max}, возникающих при резонансных колебаниях стержня (при $\sigma > \sigma_{max}$ образец трескался). Величина σ_{max} вычислялась по амплитуде колебаний конца стержня, измеряемой при помощи тонкой пластинки из титаната бария.

В качестве материала для исследований была выбрана группа никель-цинковых ферритов стехиометрического состава с содержанием феррита цинка 0, 10, 15, 20, 25, 30, 40 и 50 молекулярных процентов, а также феррит никеля с присадками феррита кобальта в количестве 1, 2, 3, 4,5 молекулярных процентов (добавление небольшого количества феррита кобальта ведет, как указано в [26], к компенсации кристаллографической магнитной анизотропии при определенной температуре и соответственно к увеличению μ, k и $1/E$, уменьшению H_c).

Ввиду того, что свойства ферритов определяются не только их химическим составом, но в значительной степени и технологией изготовления, было проведено исследование влияния технологических факторов на свойства материала (см. [13]). В результате был выбран одинаковый для всех составов технологический режим, обеспечивающий получение возможно большей плотности ферритов, так как, как показали эксперименты, более плотные ферриты обладают большей механической прочностью, большей добротностью, меньшими потерями на гистерезис; величина $\eta_{эа}$ опытных преобразователей заметно возрастала с увеличением плотности материала при данном химическом составе. Пористость ферритов, полученных по установленной технологии и определяемая как $P = 1 - d/D$, где D — кристаллографическая плотность вещества, составляла не более 2—3%.

Для группы никель-цинковых ферритов с увеличением содержания цинка наблюдалось монотонное изменение свойств — уменьшение λ_s, k, H_c, λ, увеличение μ и Λ. В ряду никель-кобальтовых ферритов максимум k, μ, λ, Λ при комнатной температуре имел место для состава с 2% феррита кобальта. Ниже будут подробнее рассмотрены свойства четырех типов ферритов, выбранных из числа исследованных. В зависимости от конкретных требований, предъявляемых к преобразователю, для его изготовления может быть выбран тот или иной тип материала.

В табл. 1 приведен условный номер, химический состав и основные механические параметры четырех типов ферритов. Значения параметров даны для комнатной температуры. Для сравнения приведены, по литературным данным, соответствующие параметры для магнитострикционных металлов.

Таблица 1

Тип материала	Химический состав	d, г/см³	c, м/сек	E, $\frac{дин}{см^2}$	σ_p
Феррит 21	$NiO\ Fe_2O_3$	5,20	5790	$1,75 \cdot 10^{12}$	0,34
Феррит 38	$NiO_{0,5}\ ZnO_{0,5}\ Fe_2O_3$	5,27	5940	$1,75 \cdot 10^{12}$	0,35
Феррит 41	$NiO_{0,99}\ CoO_{0,01}\ Fe_2O_3$	5,21	5750	$1,75 \cdot 10^{12}$	0,32
Феррит 42	$NiO_{0,98}\ CoO_{0,02}\ Fe_2O_3$	5,21	5490	$1,57 \cdot 10^{12}$	0,34
Никель		8,85	4780	$2,0 \cdot 10^{12}$	
Пермендюр		8,2	5180	$2,2 \cdot 10^{12}$	
Альфер		6,7	4750	$1,5 \cdot 10^{12}$	

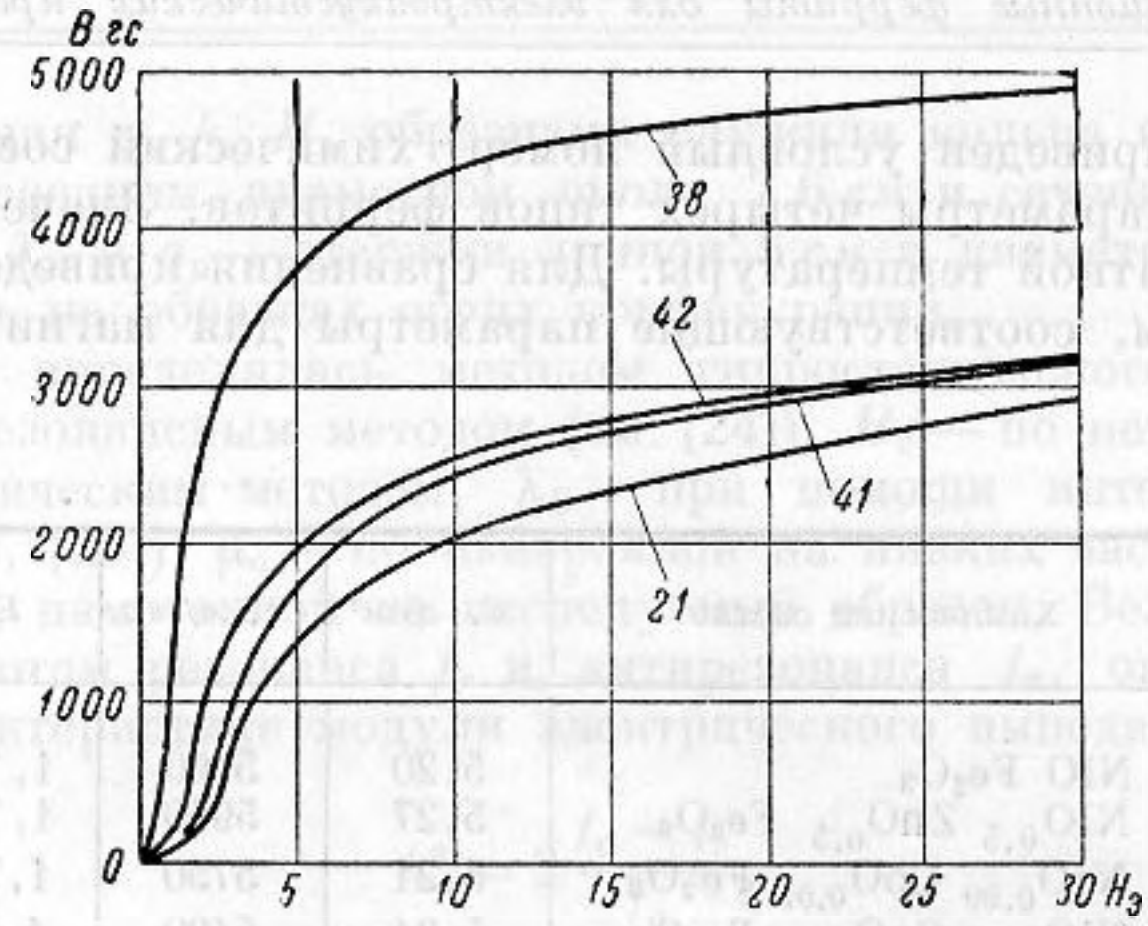
Основные магнитные и магнитострикционные свойства для этих типов ферритов при температуре 18—20° даны в табл. 2 и на фиг. 1—5.

На фиг. 1 даны основные кривые намагничения для магнитострикционных ферритов различных составов, характеризующие магнитное поведение вещества. В табл. 2, кроме уже упомянутых, существенных для преобразования параметров, дана величина начальной магнитной проницаемости μ_0, употребляемая часто в качестве характеристики магнитных материалов. Значения μ, k, λ и Λ даны при остаточном намагничении (с индексом r) и при оптимальной величине H_0 (с индексом опт). $H_{0опт}$ соответствует максимуму k и определяется по графику фиг. 3. Следует отметить, что, как показали эксперименты, для работы излучателей с большой амплитудой следует применять значения H_0 несколько большие, чем $H_{0опт}$, так как при этом дольше сохраняется линейная зависимость между звуковым давлением и амплитудой B и неизменность $\eta_{эа}$.

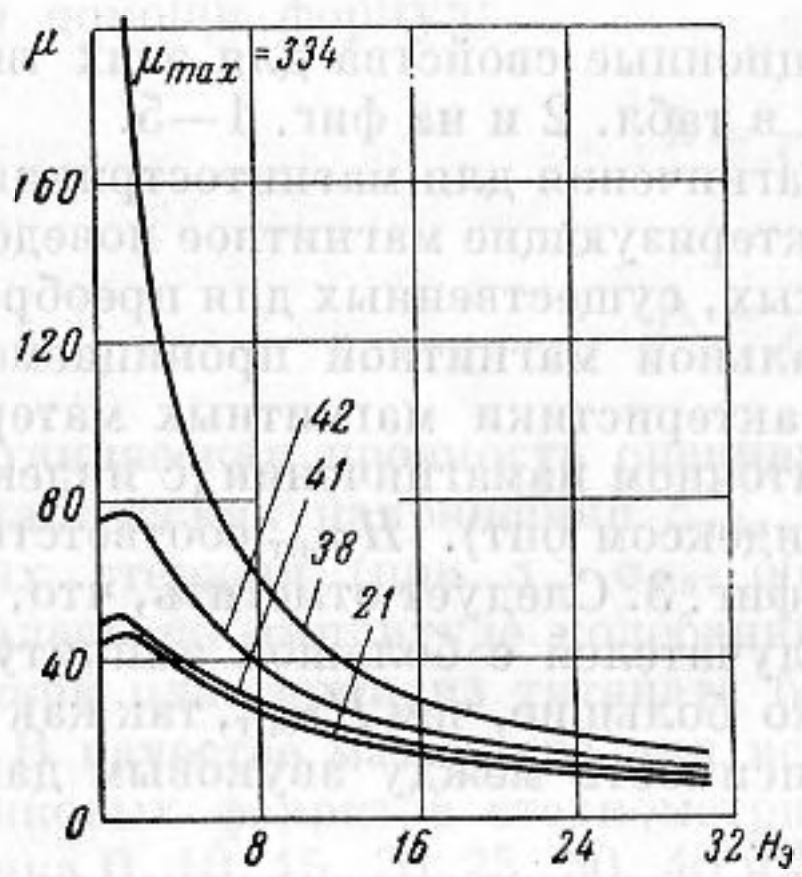
Значения параметров магнитострикционных металлов, взятые из различных источников, часто заметно различаются. В табл. 2 даны крайние значения их.

Данные табл. 2 показывают, что по основным существенным для преобразования параметрам ферриты практически не уступают магнитострикционным металлам. Величина λ_s для ферритов 21, 41 и 42 достаточно высока с точки зрения возможности получения большой интенсивности излучаемого звука. Наиболее высокие значения k, λ и Λ имеет феррит 42, для которого компенсация магнитной анизотропии имеет место при 20°. Он же обладает наименьшей величиной H_c, т. е. наименьшими среди указанных составов потерями на гистерезис. Этот материал может эффективно применяться и в режиме излучения и в режиме приема ввиду значительной величины как λ, так и Λ. Ферриты 21 и 41 лишь немного уступают ферриту 42 по величине k и λ, они могут с успехом применяться для изготовления излучателей. Можно отметить, что феррит 41, для которого точка компенсации анизотропии лежит ниже 0°, занимает по своим свойствам промежуточное положение между ферритами 21 и 42. Феррит 38 является наиболее магнитомягким во всей группе составов, а магнитострикционный эффект для него минимален. Ввиду малого значения λ_s, k, λ он не может быть рекомендован в качестве материала для излучателей, однако величина Λ за счет высокого μ имеет достаточное значение для применения феррита 38 в приемниках ультразвука.

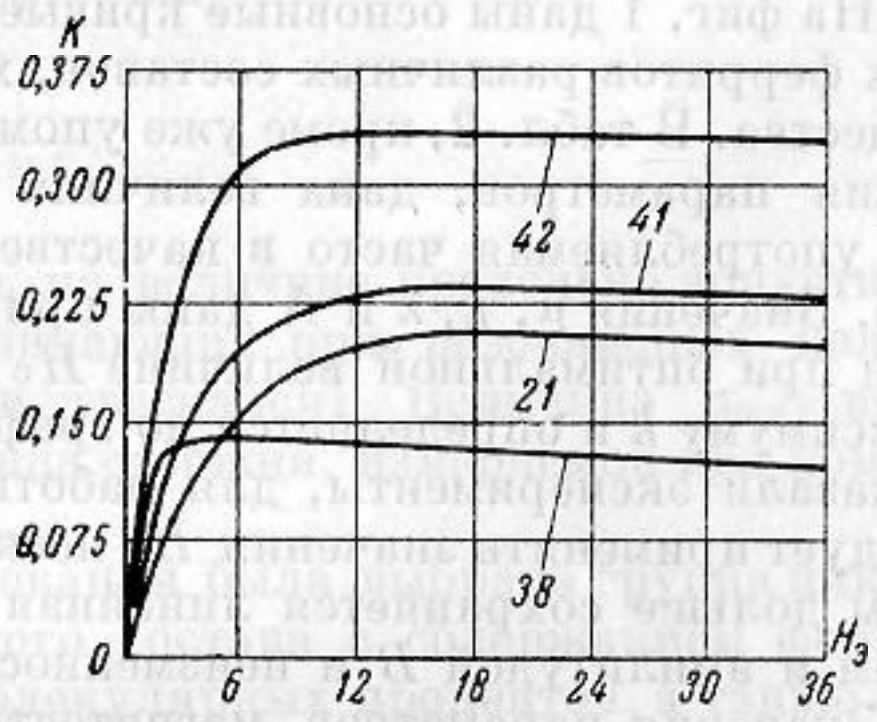
Сравнивая величины Λ_r, $\Lambda_{опт}$ из табл. 2 и данные фиг. 5, можно увидеть, что величина Λ при остаточном намагничении немного выше величины $\Lambda_{опт}$ и не более чем на 20% ниже максимального значения Λ, так что в режиме приема целесообразно применять ферриты с остаточным намагничением.



Фиг. 1. Зависимость индукции B от магнитного поля H для магнитострикционных ферритов различных составов



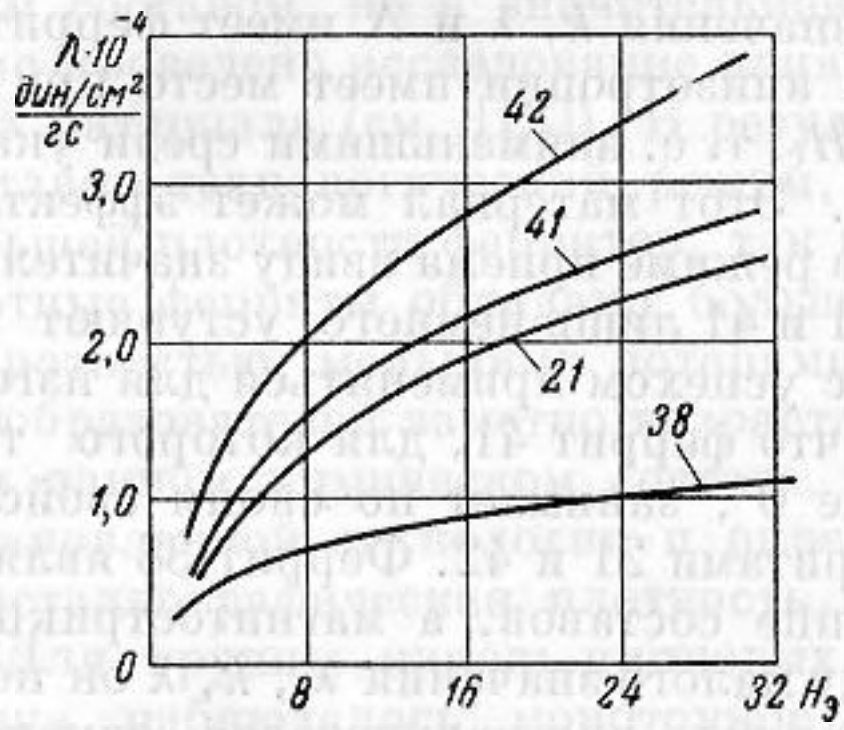
Фиг. 2



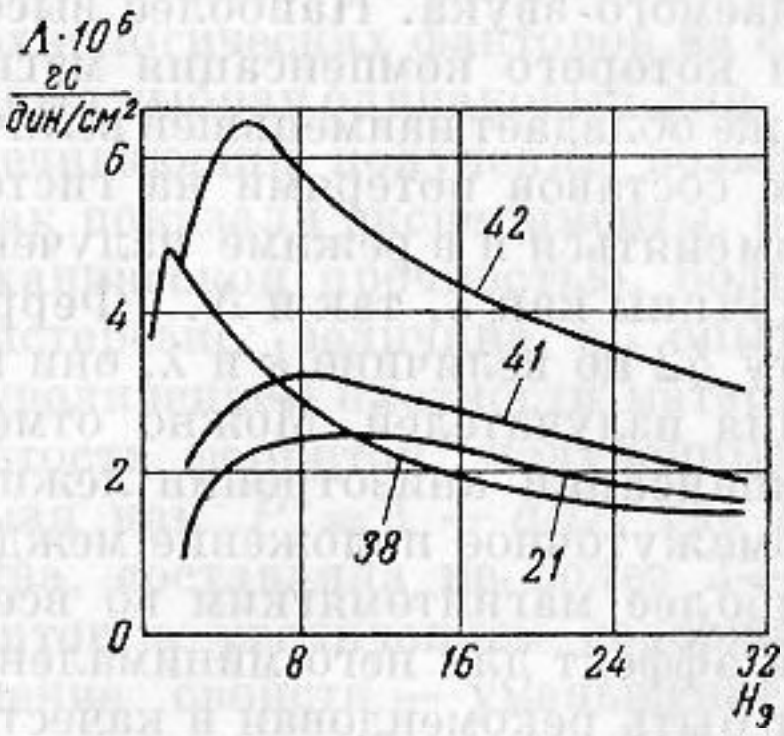
Фиг. 3

Фиг. 2. Зависимость реверсивной магнитной проницаемости μ от величины постоянного магнитного поля H_0 для четырех типов магнитострикционных ферритов

Фиг. 3. Зависимость коэффициента магнито-механической связи k от величины H_0 для магнитострикционных ферритов



Фиг. 4



Фиг. 5

Фиг. 4. Зависимость магнитострикционной постоянной λ от величины H_0 для магнитострикционных ферритов

Фиг. 5. Зависимость магнитострикционной постоянной Λ от величины H_0 для магнитострикционных ферритов

Графики фиг. 2—5 указывают на заметную зависимость параметров ферритов от величины H_0. Эта особенность, как и нелинейность зависимости σ, ε, B от амплитуды магнитного поля, является следствием низкой индукции насыщения ферритов. Нелинейность зависимости σ, ε и B от H проявляется в нарушении стабильности свойств излучателей при работе на больших интенсивностях и ограничивает предельную интенсивность излучения.

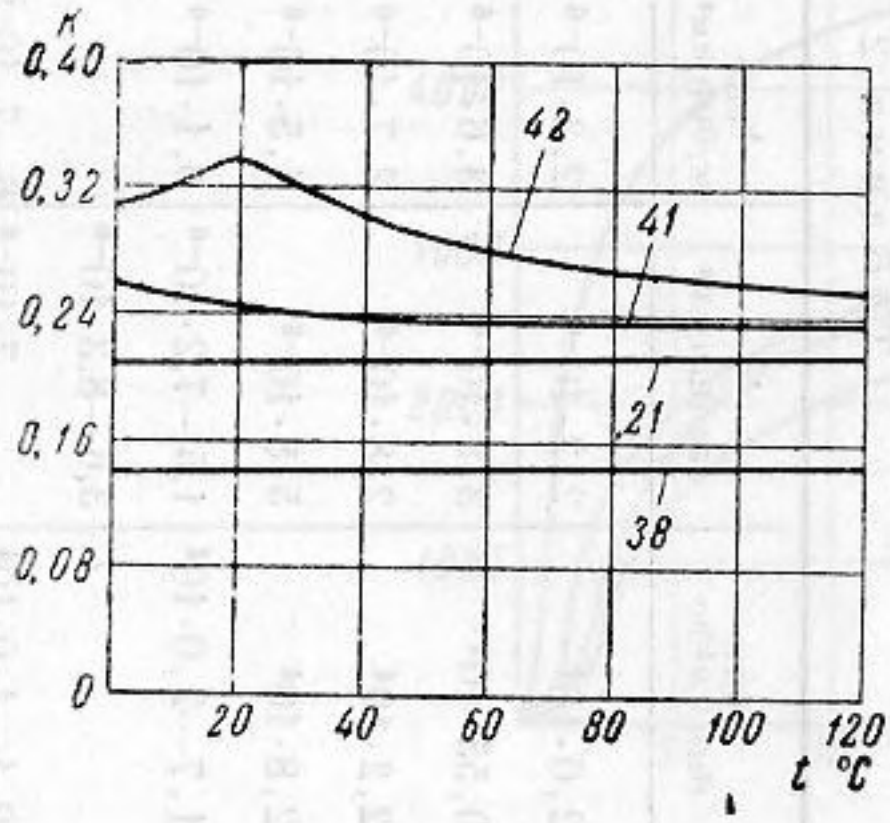
При измерениях механической прочности на стержнях из ферритов диаметром 5 *мм* достигались значения механических напряжений до 400 *кг/см*². Однако надо иметь в виду, что для образцов с большей площадью поперечного сечения и более сложной конфигурации прочность должна быть меньше (типичное явление для керамических материалов). Реальный предел достижимой интенсивности звука следует оценивать уже по самим излучателям.

Механическая добротность колец из магнитострикционных ферритов при работе в воздухе с амплитудой возбуждающего поля около 10—15 *мэрст* составляла около 600.

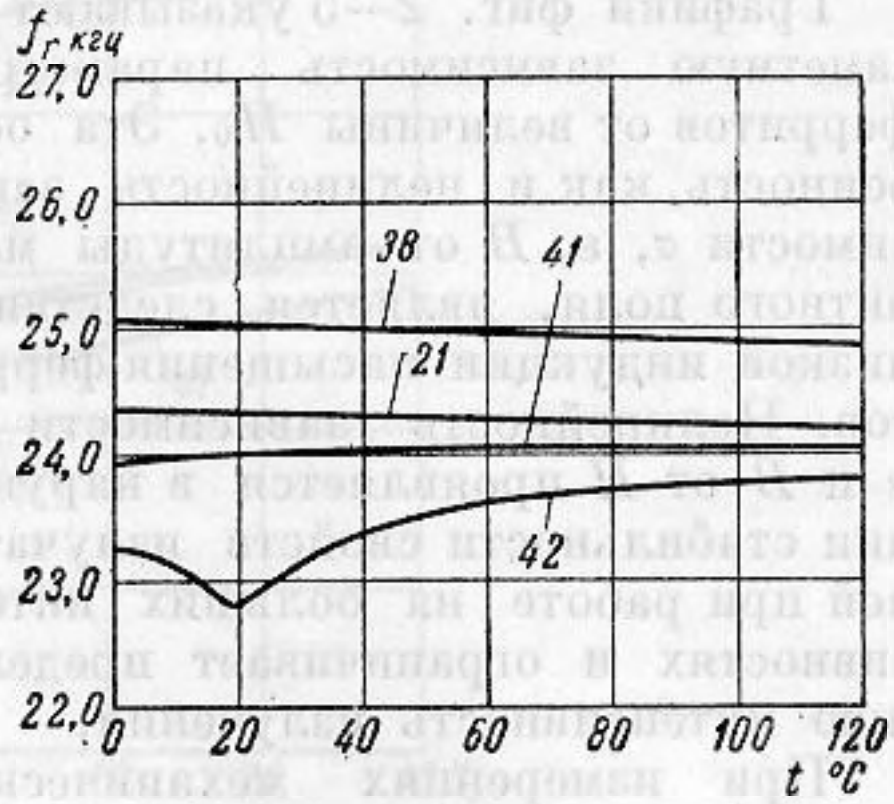
Удельное электрическое сопротивление для всех четырех типов ферритов было порядка 10^3 Ω *см*. Глубина проникновения переменного магнитного поля составляет при этом на частоте 100 *кгц* для значения μ, равного 300 (наиболее высокое μ для всей группы ферритов) около 30 *см*, чем подтверждается возможность изготовления монолитных сердечников. Величина ρ_Φ, вычисленная по формуле (4), составляет при тех же условиях и при толщине материала 1 *см* около 0,015 единиц CGSM. В случае если бы электрические потери в материале определялись бы только токами Фуко, тангенс электрических потерь $\mathrm{tg}\delta_э$ имел бы величину порядка 10^{-5}. Полученное экспериментально минимальное значение $\mathrm{tg}\ \delta_э$ составляло 3.10^{-2}, откуда следует, что потери на токи Фуко в магнитострикционных ферритах практически не сказываются и основным видом электрических потерь в материале следует считать потери на гистерезис. При использо-

Таблица 2

Тип материала	λ_s	H_c эрст	$H_{c\,опт}$ эрст	μ_e	μ_r	$\mu_{опт}$	k_r	$k_{опт}$	λ_r дин/см²/гс	$\lambda_{опт}$ дин/см²/гс	Λ_r гс/дин/см²	$\Lambda_{опт}$ гс/дин/см²
Феррит 21	$-26\cdot10^{-6}$	2,8	18	44	34	16	0,15	0,21	$0,9\cdot10^4$	$2,0\cdot10^4$	$2,2\cdot10^{-6}$	$2,2\cdot10^{-6}$
Феррит 38	$-9\cdot10^{-6}$	0,35	5	330	270	90	0,10	0,14	$0,23\cdot10^4$	$0,55\cdot10^4$	$3,9\cdot10^{-6}$	$3,6\cdot10^{-6}$
Феррит 41	$-26\cdot10^{-6}$	2,3	16	51	40	19	0,16	0,24	$1,0\cdot10^4$	$2,2\cdot10^4$	$2,8\cdot10^{-6}$	$2,7\cdot10^{-6}$
Феррит 42	$-26\cdot10^{-6}$	2,0	16	73	82	22	0,23	0,33	$1,0\cdot10^4$	$2,8\cdot10^4$	$5,8\cdot10^{-6}$	$4,5\cdot10^{-6}$
Никель	$-30—40\cdot10^{-6}$	0,7	10—15	100—400		40—70	0,14—0,20	0,15—0,31	$0,5—0,8\cdot10^4$	$1,7—2,0\cdot10^4$	$1,5—7,2\cdot10^{-6}$	$6,1\cdot10^{-6}$
Пермендюр	$+70\cdot10^{-6}$	2		700	50—70		0,18—0,31	0,25—0,37	$1,1—1,2\cdot10^4$		$3,6—8,3\cdot10^{-6}$	
Альфер	$+40\cdot10^{-6}$	0,7	6—10	1000	100—350	190	0,20—0,25	0,25—0,28	$1,0\cdot10^4$	$0,4—1,0\cdot10^4$	$7\cdot10^{-6}$	$6—7\cdot10^{-6}$



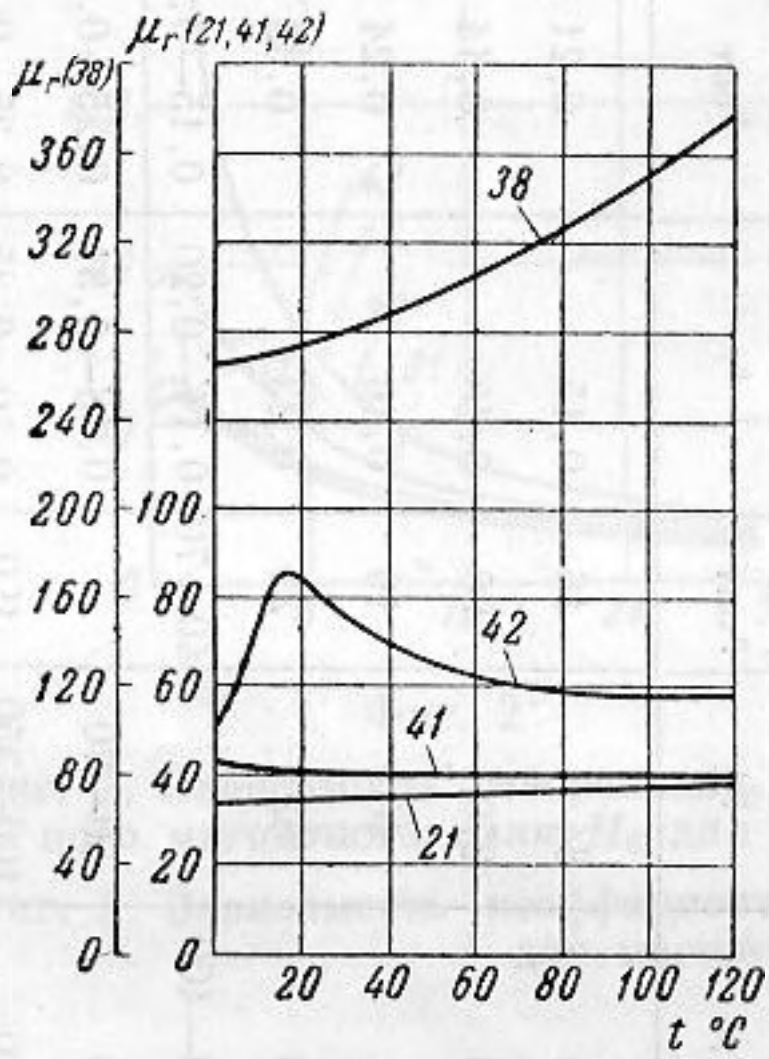
Фиг. 6



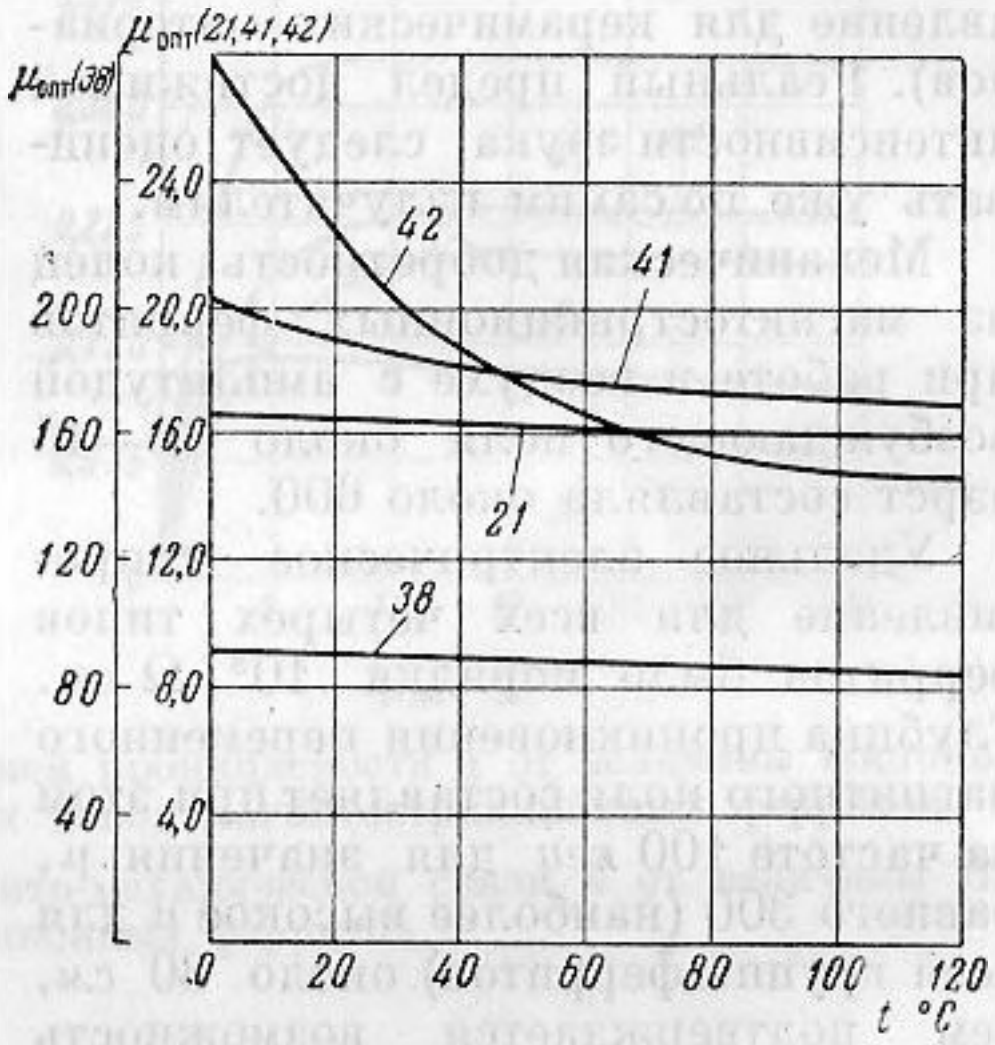
Фиг. 7

Фиг. 6. Зависимость коэффициента магнито-механической связи k для магнитострикционных ферритов от температуры t°; H_0 имеет оптимальное значение для каждого состава

Фиг. 7. Зависимость резонансной частоты f_r при оптимальном значении H_0 от температуры t°



Фиг. 8

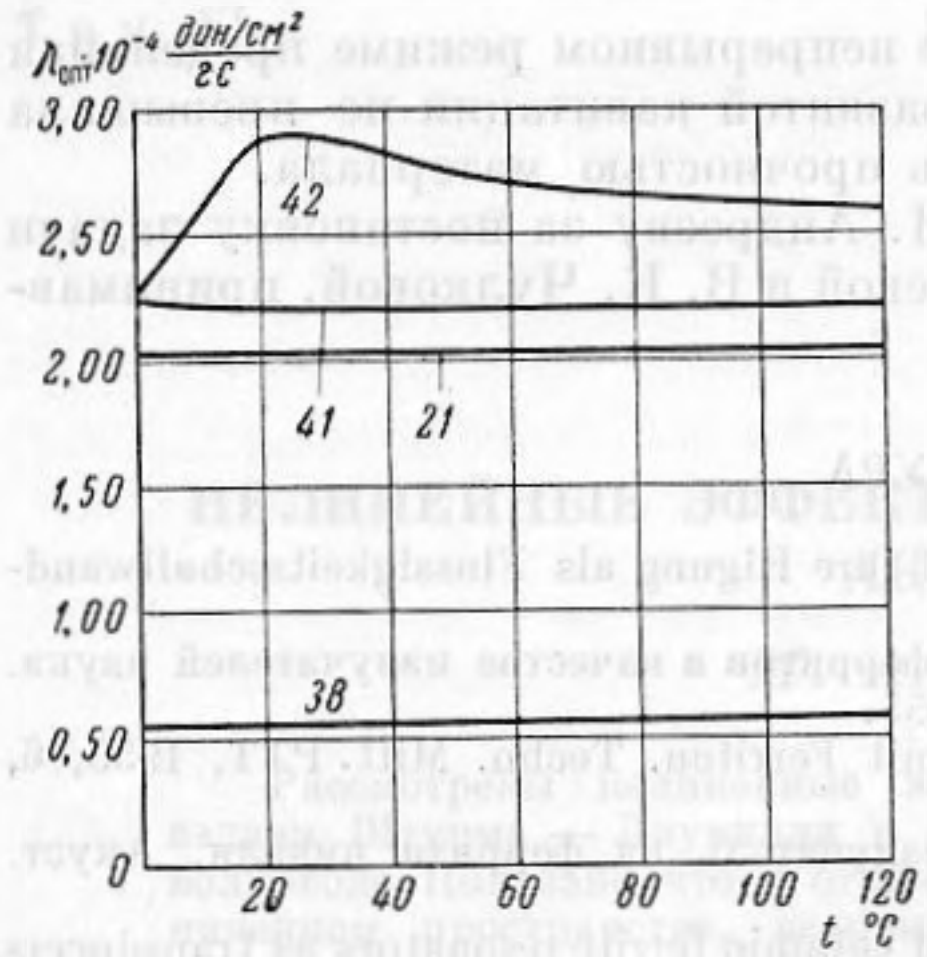


Фиг. 9

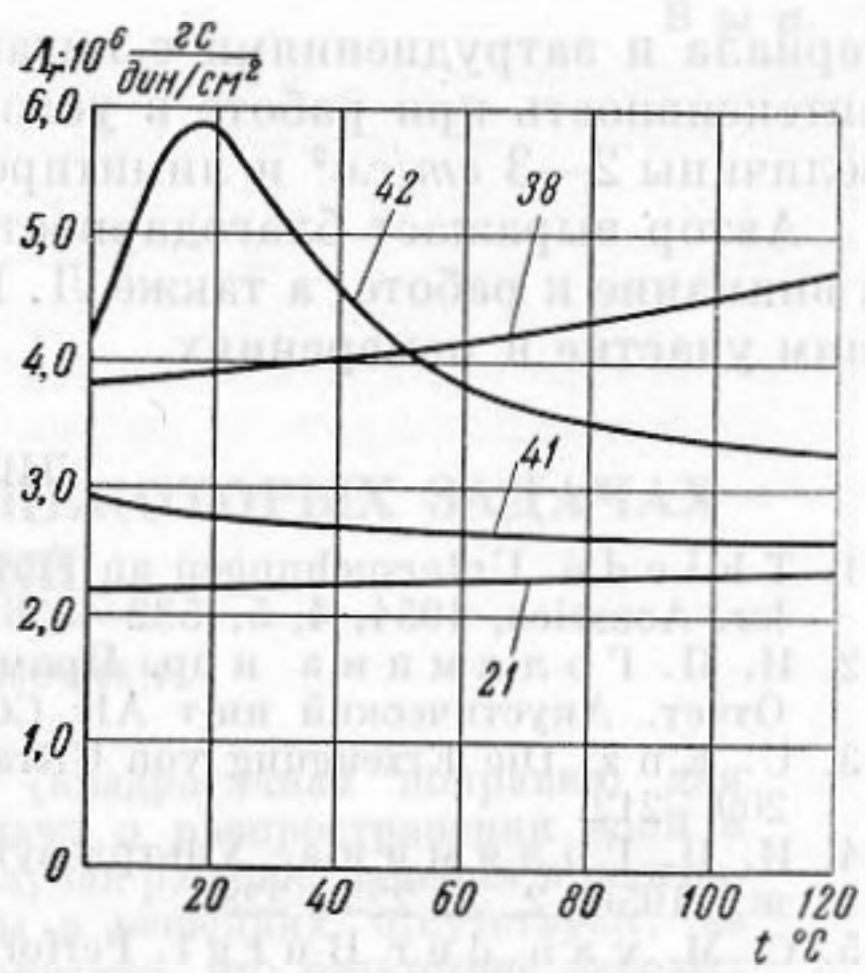
Фиг. 8. Зависимость магнитной проницаемости μ_r при остаточном намагничении от температуры t°

Фиг. 9. Зависимость магнитной проницаемости $\mu_{опт}$ при оптимальном значении H_0 от температуры t°

вании ферритовых преобразователей может встретиться необходимость работы их при различных температурах (температура изменяется как за счет внешней среды, так и за счет нагревания самого излучателя при интенсивных колебаниях). Поэтому необходимо знать, как будут меняться свойства материала в зависимости от температуры t°. Зависимость f_r, k, μ, λ, Λ от t° для магнитострикционных ферритов в интервале от 0 до 120° представлена на фиг. 6—11. Из этих графиков видно, что наиболее эффективный с акустической точки зрения материал — феррит 42 имеет и наиболее резко выраженную зависимость свойств от температуры. Величина k и λ для него остаются, правда, во всем интервале температур выше значений этих величин для других типов ферритов, но при этом уход f_r по сравнению с



Фиг. 10

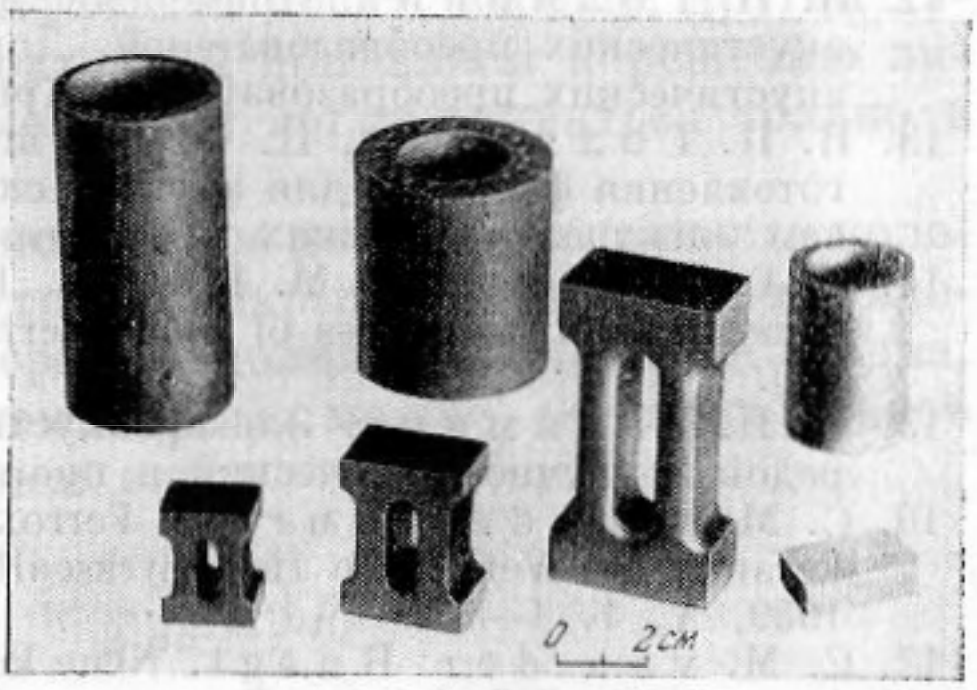


Фиг. 11

Фиг. 10. Зависимость магнитострикционной постоянной $\lambda_{опт}$ при оптимальном значении H_0 от температуры $t°$

Фиг. 11. Зависимость магнитострикционной постоянной Λ_r при остаточном намагничении от температуры $t°$

ее значением при 20° составляет 4%, уход $k_{опт}$ — 24%, уход $\lambda_{опт}$ — 22%; уход Λ_r достигает 43%. Поэтому в случаях, когда требуется стабильность работы преобразователя, применение феррита 42 не может быть рекомендовано. В этих случаях следует выбирать материалы с менее эффективными параметрами, но с большей температурной стабильностью. Так, например, в интервале от 0 до 50° для приемников целесообразнее применять феррит 38, вместо феррита 42. Значительной стабильностью свойств с точки зрения акустических применений обладает феррит 21: температурный коэффициент f_r (определяемый как $\Delta f_r/\Delta t$) в указанном интервале составляет примерно—6.10^{-5}, температурный коэффициент $k + 3.10^{-5}$, температурный коэффициент $\lambda_{опт} + 1.10^{-4}$, температурный коэффициент $\Lambda_r + 8.10^{-4}$. Феррит 41 обладает достаточной стабильностью при температурах выше 20—40°. При выборе материала для преобразователя следует учитывать и температурную зависимость μ, так как ее изменение может сказываться на условиях согласования с питающей аппаратурой.



Фиг. 12. Сердечники для преобразователей стержневого и цилиндрического типа, изготовленные из магнитострикционных ферритов. Резонансные частоты стержневых образцов — 26, 55 и 74 *кгц*

Измеряя зависимость параметров материала от $t°$, можно заметить, что если характер зависимости k, f, λ не меняется при изменении величины H_0, то для μ может сильно измениться самый вид зависимости (см. фиг. 8,9).

Из материалов с описанными свойствами изготавливались сердечники опытных преобразователей, изображенные на фиг. 12.

Стержневые излучатели, изготовленные из ферритов 21 и 42, имели при работе в воде величину $\eta_{эа}$ 70—80% независимо от их резонансной частоты; в импульсном режиме при их помощи создавались интенсивность звука до 7 *вт/см*^{2}, причем предел обусловливался нелинейностью свойств ма-

терпала и затруднениями с питанием; в непрерывном режиме предельная интенсивность при работе в условиях развитой кавитации не превышала величины 2—3 *вт/см*² и лимитировалась прочностью материала.

Автор выражает благодарность Н. Н. Андрееву за постановку задачи и внимание к работе, а также Л. И. Ганевой и В. К. Чулковой, принимавшим участие в измерениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Thiede. Untersuchungen an Ferriten auf ihre Eigung als Flussigkeitsschallwandler. Acustica, 1954, 4, 5, 532—536.
2. И. П. Голямина и др. Применение ферритов в качестве излучателей звука. Отчет. Акустический ин-т АН СССР, 1955.
3. U. Enz. Die Erzeugung von Ultraschall mit Ferriten. Techn. Mitt. PTT, 1955, 6, 209—212.
4. И. П. Голямина. Ультразвуковой излучатель из феррита никеля. Акуст. ж., 1956, 2, 2, 225—228.
5. C. M. van der Burgt. Performance of ceramic ferrite resonators as transducers and filter elements. J. Acoust Soc. America, 1956, 28, 6, 1020—1031.
6. C. M. van der Burgt. Ferroxcube-werkstoffe für piezomagnetische Schwinger. Philip's techn. Rundschau, 1956—1957, 18, 10, 277—290.
7. И. П. Голямина. Применение ферритов в качестве излучателей ультразвука. Доклад на Всесоюзной конференции по использованию ультразвуковой техники в промышленности. Май 1957 г. М., Машгиз, 1959.
8. И. П. Голямина, А. Д. Соколов, В. К. Чулкова. Испытания опытных ультразвуковых приемников из ферритов. Акуст. ж., 1957, 3, 3, 288—290.
9. И. П. Голямина, Н. Ф. Старостина, В. К. Чулкова. Исследование ферритов в качестве материала для магнитострикционных электроакустических преобразователей. Отчет. Акустический ин-т АН СССР, 1957.
10. Y. Kikuchi. Performance of magnetostrictive transducers made of aluminium-iron alloy on nickel-copper ferrite. J. Acoust. Soc. America, 1957, 29, 5, 569—573.
11. H. D. Root, J. Mc Donald. Ceramic ultrasonic magnetostrictive transducer. J. Amer. Ceram. Soc., 1957, 40, 1, 1—5.
12. И. П. Голямина. Применение ферритов в качестве материала для электроакустических преобразователей. Доклад на конференции по вопросам электроакустических преобразователей. Крыница, (ПНР), сентябрь 1958.
13. И. П. Голямина, Н. Ф. Шишкина. Некоторые вопросы технологии изготовления ферритов для акустических целей. Доклад на конференции по вопросам электроакустических преобразователей. Крыница (ПНР), сентябрь, 1958.
14. S. F. Ferebee, C. M. Davis. Effect of divalent substitution on the magnetomechanical properties of nickel ferrite. J. Acoust. Soc. America, 1958, 30, 747—750.
15. И. П. Голямина. Электроакустические преобразователи из ферритов. «Передовой научно-технический и производственный опыт», М., ВИНИТИ, 1959.
16. C. M. van der Burgt. Ferroxcube 7A1 and 7A2 neue piezomagnetische keramische Werkstoffe für Ultrascallschwinger höherer Leistung. Valvo Berichte, 1959, V, 1, 1—33.
17. C. M. van der Burgt. Neue keramische Ultrascallwandler und deren Kopplung an die Flüssigkeit. Доклад на III Международном акустическом конгрессе, Штутгарт (ФРГ), сентябрь 1959.
18. И. П. Голямина. Исследования магнитострикционных электроакустических преобразователей из ферритов. Доклад на III Международном акустическом конгрессе, Штутгарт (ФРГ), сентябрь, 1959.
19. S. Butterworth, F. D. Smith. The equivalent circuit of the magnetostriction oscillator. Proc. Phys. Soc. (London), 1931, 43, 166—185.
20. Л. Я. Гутин. К теории магнитострикционного преобразователя. Ж. техн. физ., 1945, 15, 4—5, 239—247.
21. Л. Я. Гутин. Магнитострикционные излучатели и приемники. Ж. техн. физ., 1945, 15, 12, 924—941.
22. Р. Бозорт. Ферромагнетизм. М, ИЛ., 1956, стр. 614.
23. В. В. Фурдуев. Электроакустика. М.—Л., ГТТИ, 1948.
24. И. П. Голямина, Е. В. Романенко. Установка для определения упругих постоянных твердых тел. Приборы и техн. эксперим., 1958, 5, 90—94.
25. И. П. Голямина, Н. А. Рой. Устройство для измерения магнитострикции интерферометрическим методом. Приборы и техн. эксперим., 1956, 2, 129—131.
26. C. M. van der Burgt. Controlled cristal anisotropy and controlled temperature dependance of the permeability and elasticity of varions cobalt — substituted ferrites. Phillip's Res. Rept., 1957, 12, 1, 97—122.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступила в редакцию
19 мая 1960 г.