

УДК 534.232

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПЬЕЗОМАГНИТНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ФЕРРИТОВ

З. Качковски

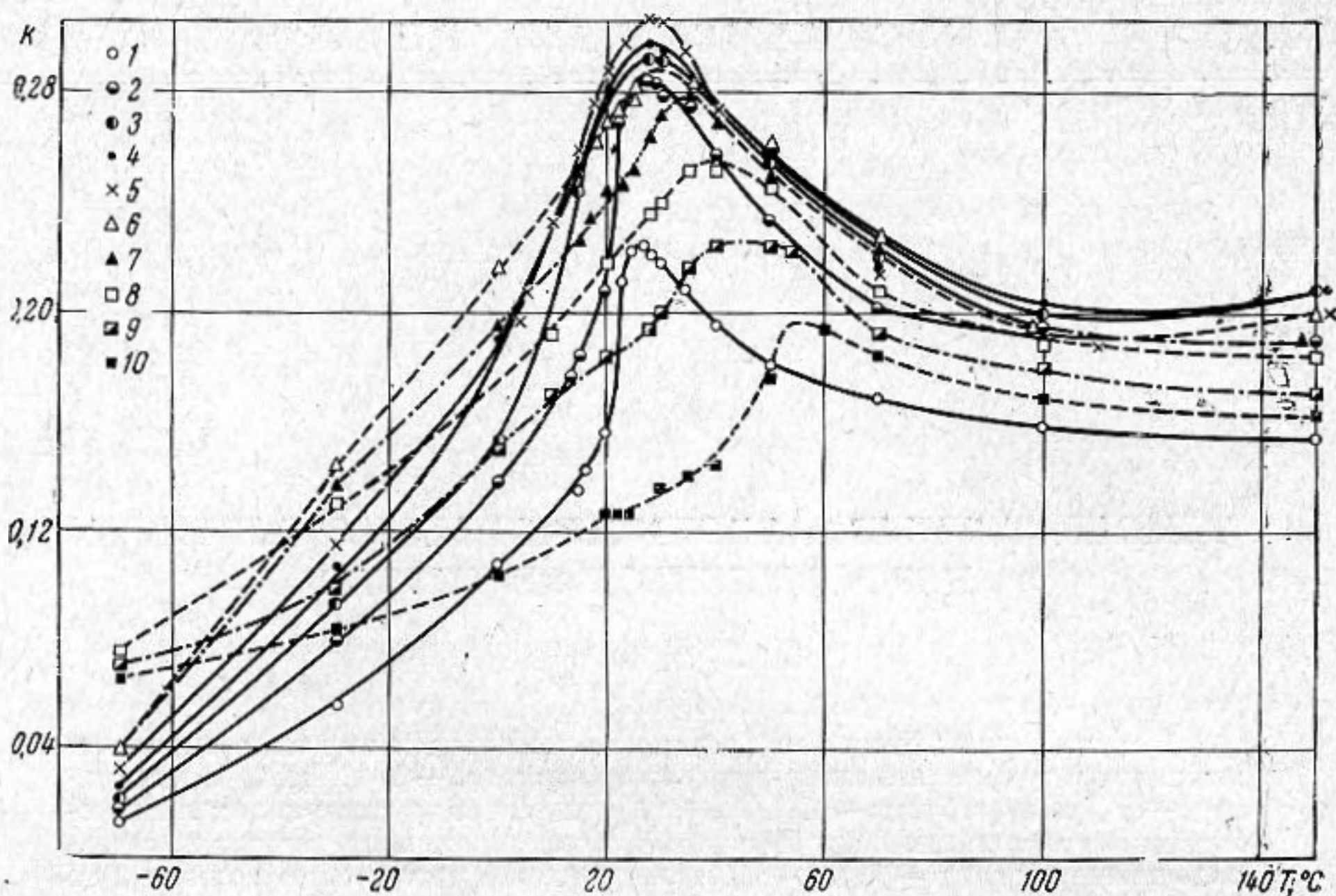
Для никелевых ферритов с примесью кобальта и марганца определены температурные зависимости пьезомагнитных — k , d , g , l , h , магнитных — μ_a , μ_g и упругих — E_H , E_V коэффициентов, участвующих в системах магнитоэлектрических уравнений. Исследования проведены в интервале температур от -70 до $+150^\circ$ для значений постоянного поля от 3 до 50 э на первичной кривой намагничивания при амплитуде переменного поля, равной 2 мэ. Констатируется явление смещения экстремумов с изменением подмагничивания; отмечается также появление нескольких экстремальных точек для коэффициентов d , h , g и e .

На основе систем уравнений магнитоэлектрики (см., например, [1—4]) и соотношений между их коэффициентами [2, 3] экспериментально определялись температурные зависимости пьезомагнитных, магнитных и упругих коэффициентов для разных значений постоянного магнитного поля H . Значения H изменялись через малые интервалы в пределах до 50 э и соответствовали первичной кривой намагничивания*. Предметом исследований служили ферриты E1 с химической формулой $Ni_{0,953}Co_{0,027}Mn_{0,02}Fe_2O_4$ [6], отличающиеся большим коэффициентом магнитомеханической связи для остаточного намагничивания ($k_r > 0,3$) и большой магнитоэлектрической чувствительностью ($d \approx 5 \cdot 10^{-6}$ гс·см²/дин = $5 \cdot 10^{-9}$ вб/н). Испытания проводились на образцах тороидальной формы с резонансной частотой $f_r \approx 70 \div 100$ кГц, подвешиваемых в кассетах из плексигласа, в интервале температур $-70 \div +150^\circ$; применялась измерительная методика, разработанная автором [7, 8]. Амплитуда переменного поля H_{\sim} составляла при измерениях 2 мэ. Коэффициент магнитомеханической связи k определялся по резонансным характеристикам. Температура измерялась при помощи термистора, расположенного непосредственно внутри кассеты [8].

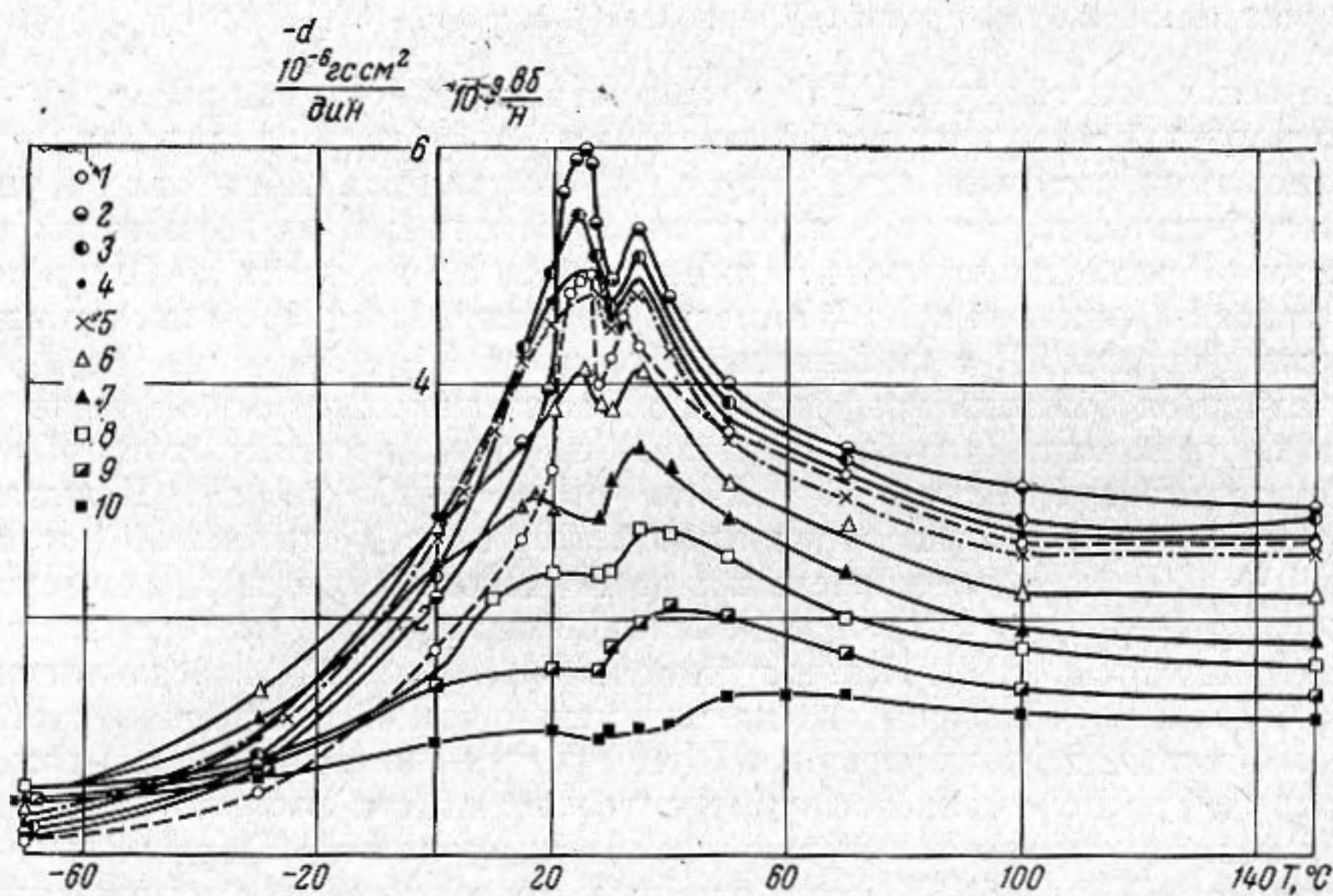
На фиг. 1 показаны температурные зависимости k для феррита E1 в интервале от -70 до $+150^\circ$, определенные по изотермам k , измеренным в этих же пределах [9]. Обозначения 1—10 на фигуре отвечают последовательно возрастающим значениям постоянного поля H , а именно: 3, 4, 5, 6, 7, 10, 15, 20, 30 и 50 э; те же обозначения приняты и на последующих фиг. 2—5.

Из фиг. 1 видно, что максимумы кривых смещаются с ростом постоянного поля H в направлении более высоких температур. Бикфорд и его соавторы, исследуя ферриты, обнаружили появление максимумов проницаемости μ в точке компенсации постоянной магнитокристаллической анизотропии [10, 11]. Дальнейшие исследования [12, 15] подтвердили появление максимумов μ и k , также связанных с точкой компенсации магни-

* Результаты измерений упомянутых коэффициентов при комнатной температуре в зависимости от постоянного поля и соответствующие петли гистерезиса были темой более ранней работы автора [5].



Фиг. 1



Фиг. 2

токристаллической анизотропии в ферритах состава Ni — Co, Ni — Zn — Co. Эти измерения касались начальных условий, оптимального и остаточного намагничивания. Более широкие исследования при других значениях подмагничивания до сих пор не проводились. Более ранние исследования автора настоящей статьи [16] показали, что с изменением H изменяется положение минимумов на кривых температурной зависимости резонансной частоты f_r . Это явление наблюдалось также и для максимумов k в процессе разработки метода измерения k при различных температурах, когда применялись очень чувствительные измерительные приборы — термисторы, располагаемые непосредственно на образцах [8]. Контрольные измерения на других образцах подтвердили наличие смещения экстремумов. В данной работе

также проводились контрольные исследования на тех же самых образцах, причем использовался метод непосредственного определения температурных характеристик k , с сохранением при измерениях постоянных значений подмагничивания и измерением при этом температуры в области появления экстремумов. Результаты этих измерений совпали с данными фиг. 1.

Ван дер Бургт [1, 14] предложил следующее выражение для максимального значения k :

$$k_{\text{опт}}^2 \approx \frac{\varepsilon_S^2 E_S}{|W_h| + |W_\sigma| + |W_{\text{раз}}|}, \quad (1)$$

где ε_S и E_S — магнитострикция и модуль Юнга в насыщении, W_h — энергия магнитокристаллической анизотропии, $W_\sigma = \sigma_i \varepsilon_S$ — энергия внутренних напряжений, $W_{\text{раз}}$ — энергия размагничивания, связанная с появлением нешарообразных пор внутри феррита. Это выражение объясняет появление максимума k при оптимальном подмагничивании в точке, соответствующей минимуму W_h , т. е. в точке компенсации анизотропии. Для объяснения положения экстремумов k при других значениях H следовало бы иметь более общее выражение k , в котором учитывалась бы энергия постоянного поля W_H . Однако получение такого выражения является самостоятельной довольно сложной задачей и выходит за рамки настоящей работы.

Магнитострикционная чувствительность d , определяющая влияние напряжений на магнитную индукцию, выражается в системе MKSA_{рац} формулой (см., например, работу [2]):

$$d = - \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial H} \right)_{\sigma, T} = - \left(\frac{\partial B}{\partial \sigma} \right)_{H, T}, \quad (2)$$

где σ — механическое напряжение, ε — деформация, H — магнитное поле, B — индукция, T — температура.

Связь между d и другими пьезомагнитными коэффициентами h , e , g , проницаемостью μ и упругими модулями E рассмотрена автором в работах [2, 3]; она обсуждалась также Бозортом и Вильямсом [17, 18] и Ван дер Бургтом [19]. Эту связь можно выразить формулой:

$$d = \mu_\sigma g = \frac{e}{E_H} = \frac{\mu_e h}{E_H} = \frac{\mu_\sigma h}{E_B} = k \sqrt{\frac{\mu_\sigma}{E_H}}. \quad (3)$$

На фиг. 2 показаны температурные зависимости для d . Температурные зависимости d в области положительных температур были исследованы ранее в работах [15, 20]: для феррита с добавкой кобальта наблюдался максимум вблизи комнатной температуры, зависимости для никелевого и никельцинкового ферритов имели монотонный вид. Из результатов наших исследований вытекает, что для ферритов EI на температурных кривых имеются два максимума, величина которых и положение по оси T зависят от поля H .

В начальном участке первичной кривой намагничивания образца значения d в первых максимумах больше, чем во вторых; при $H = 10$ э максимумы выравниваются, а температурный интервал между ними составляет 10° . Дальнейший рост подмагничивания увеличивает интервал между максимумами, и второй максимум становится больше первого.

Постоянная магнитострикции h , обозначаемая иногда символом λ или a , является величиной, также часто используемой, как и магнитострикционная чувствительность d . Результаты исследований h для ферритов имеются в работах [15, 20], где приведены зависимость h от H при комнатной температуре и температурные характеристики $h_{\text{опт}}$ в области положительных температур. Величина h определяется в системе MKSA_{рац} формулой:

$$h = - \left(\frac{\partial \sigma}{\partial B} \right)_\varepsilon = - \left(\frac{\partial H}{\partial \varepsilon} \right)_B. \quad (4)$$

Она связана с другими коэффициентами выражениями [2, 3]:

$$h = k \sqrt{\frac{E_B}{\mu_\sigma}} = \frac{k^2}{(1 - k^2)d} = \frac{dE_B}{\mu_\sigma} = \sqrt{\frac{E_B - E_H}{\mu_\sigma}}. \quad (5)$$

На фиг. 3 показаны зависимости h от T при различных H . Как и в случае d , здесь на кривых существуют два максимума, причем первый выражен значительно слабее второго. В области, достаточно далекой от точек компенсации, например, около 70° , постоянная магнитострикции практически не зависит от T вплоть до окрестности температуры Кюри. Подмагничивание, соответствующее максимуму h , зависит от рабочей температуры.

Коэффициенты полевых напряжений e и индукционной деформации g вычислялись на основании формул (3). Их определение дано в работах [1, 2]; соотношения между этими коэффициентами и другими параметрами обсуждаются в работах [3, 21]. Результаты экспериментальных исследований этих коэффициентов до сих пор шире нигде не рассматривались.

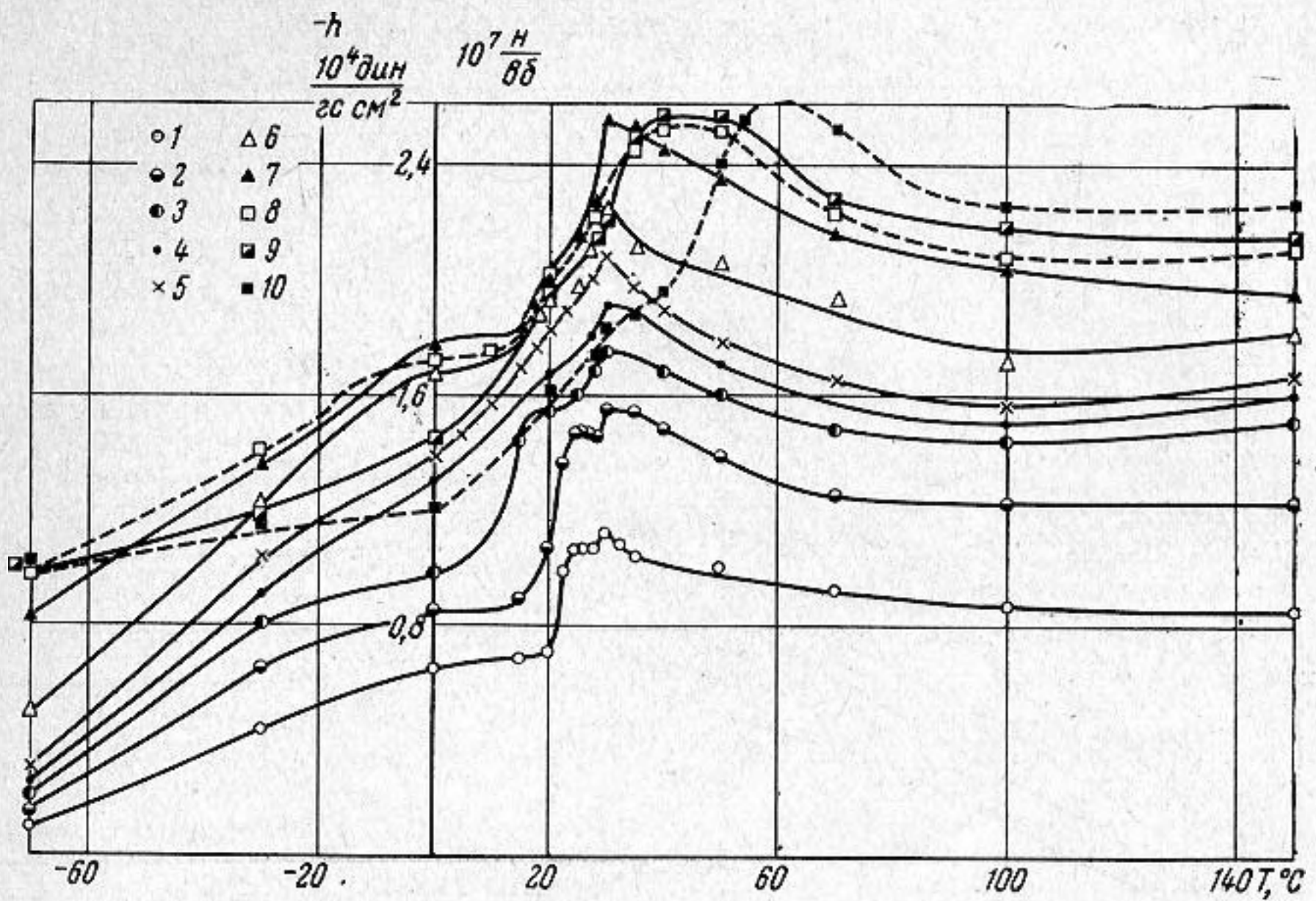
На фиг. 4 показаны температурные зависимости e . Форма кривых подобна таковой для чувствительности d : при малых H сильнее выражен первый максимум; при $H = 10$ э максимумы выравниваются, при больших H делается заметнее второй максимум. При $H > 10$ э значение коэффициента e всегда уменьшается с ростом H . В области положительных температур максимальные значения e наблюдаются при поле подмагничивания, не превышающем 5 э.

На фиг. 5 приведены температурные зависимости коэффициента g . Их форма похожа на форму зависимостей для h . Из двух максимумов заметнее выражен второй.

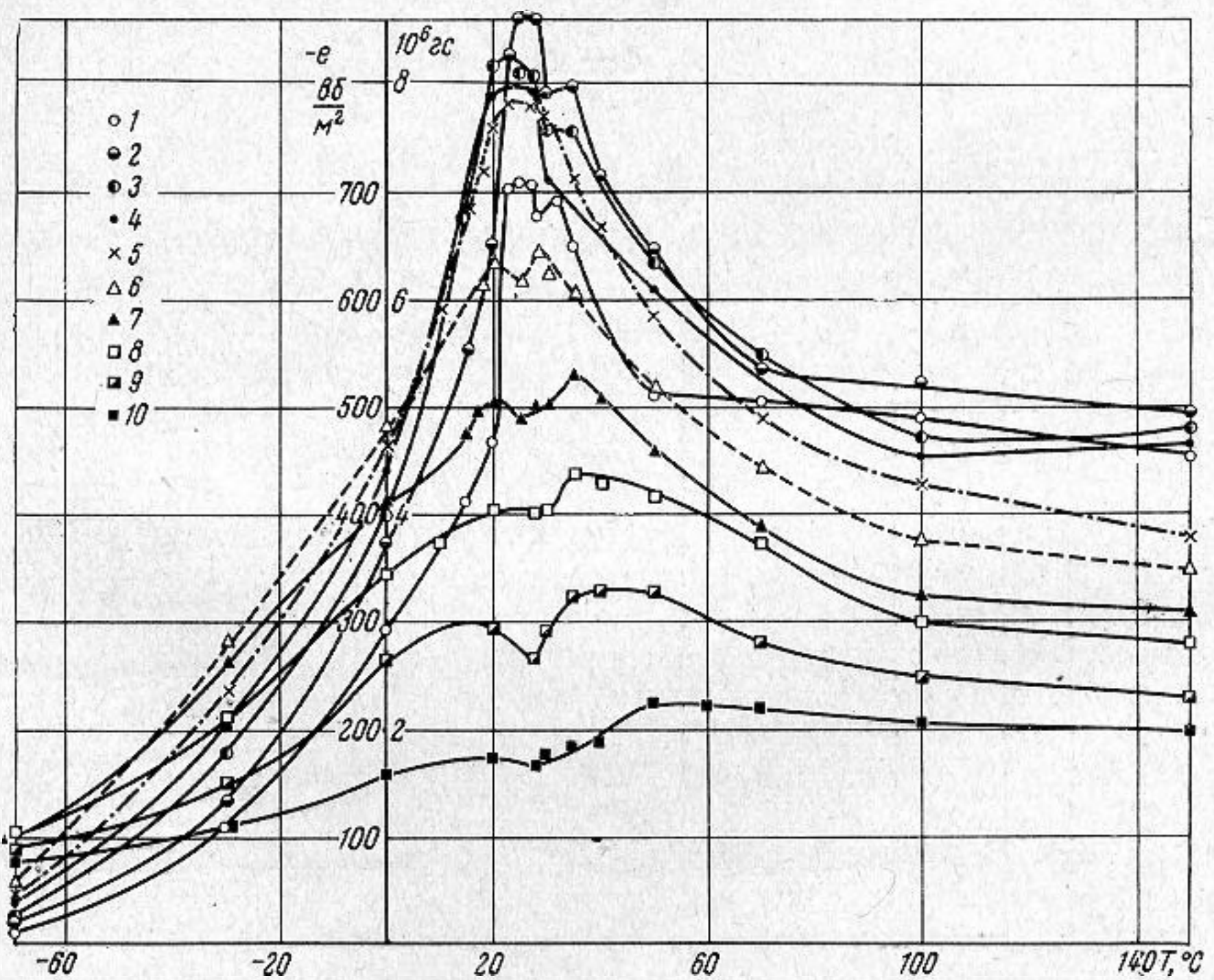
Обратимые проницаемости μ_σ и μ_e определялись из измерений индуктивности разностным методом в более широком интервале температур от -180° до $+160^\circ$ при частоте 10 кГц. Зависимость проницаемости от подмагничивания при комнатной температуре была рассмотрена в работе [5]. Для начальной проницаемости на температурной кривой наблюдался максимум, как и в случае образца с кобальтом, исследованного в работе [15].

На фиг. 6 приведены температурные зависимости для проницаемости μ_σ ; обозначения 1—12 на этой фигуре отвечают ряду возрастающих значений H , а именно 0, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20, 30 и 50 э. Положение максимума для начальной проницаемости $H = 0$ соответствует приблизительно точке компенсации постоянной магнитокристаллической анизотропии [11, 12, 22]. Рост подмагничивания сдвигает максимум μ_σ в область более низких температур; с ростом H максимумы становятся также более высокими. Интервал температур, в котором находятся экстремальные точки при изменениях H от 0 до 50 э, заключается в пределах от 30 до 0° . Температурные зависимости для μ_e почти полностью повторяют таковые для μ_σ — форма кривых, положение экстремальных точек совпадают; лишь абсолютные значения μ_e немного ниже μ_σ . Результаты, приведенные на фиг. 6, и кривые для μ_e были получены из изотерм проницаемости. Они проверялись путем непосредственных измерений μ в функции T при поддержании постоянных значений H . Не считая некоторых неотчетливых максимумов и небольших различий, вызванных температурным гистерезисом [23], можно констатировать, что общий характер кривых при проверке не изменился.

Динамические модули упругости E_H и E_B в противоположность k и μ принимают в области компенсации анизотропии минимальные значения, что видно на фиг. 7 и 8, где обозначения 1—8 соответствуют последовательно значениям H , равным 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30 и 50 э. Эти результаты получены из изотерм и проверены затем в окрестностях точек компенсации путем измерения модулей в функции температуры при постоянных значениях H . Величины E_H и E_B определялись по частотам резонанса и антирезонанса [15, 24]. В интервале 3—5 э наблюдался отрицательный ΔE_H -эффект, вопрос о котором шире рассматривается в других работах автора

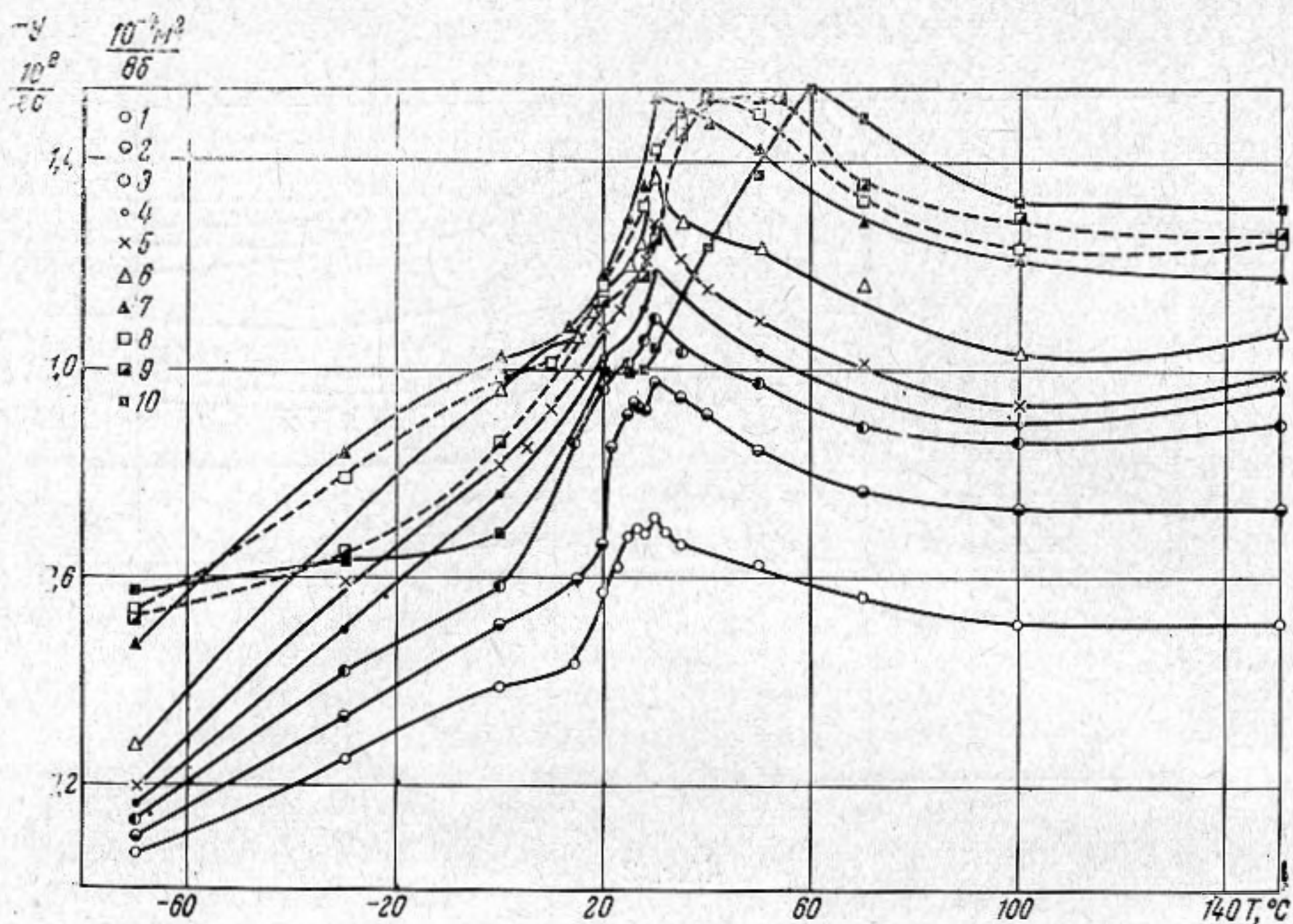


Фиг. 3

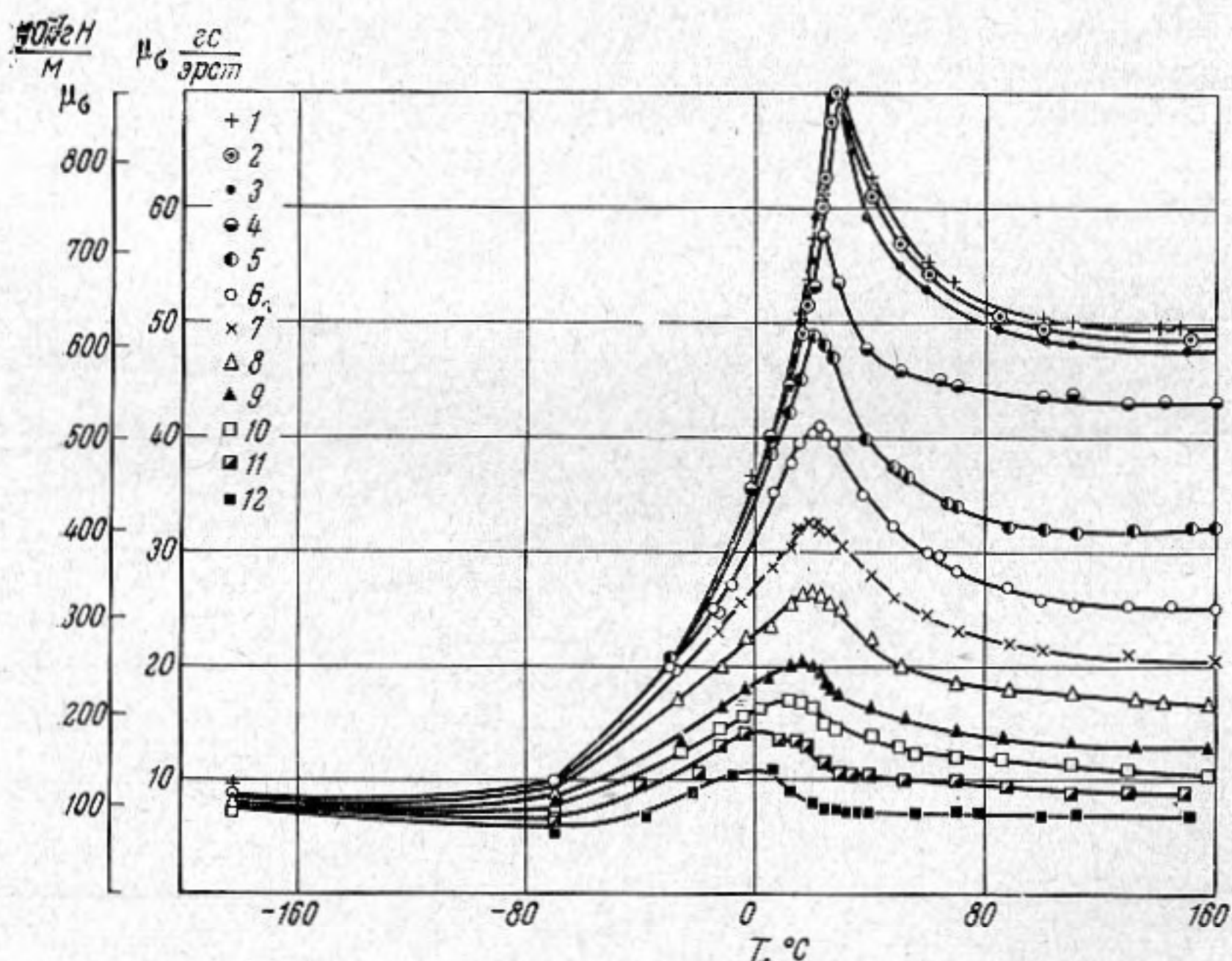


Фиг. 4

[25, 26]. Из данных фиг. 7 и 8 следует, что минимумы E смещаются с ростом H в область высших температур. Таким образом, минимумы E определяются не только минимумом абсолютного значения энергии магнитокристаллической анизотропии, но зависят также от энергии внешнего поля, которое влияет как на их глубину, так и на положение на температурной оси. Можно отметить, что исследованиями ΔE -эффекта в ферритах занимался также Кузнецов [27, 28].

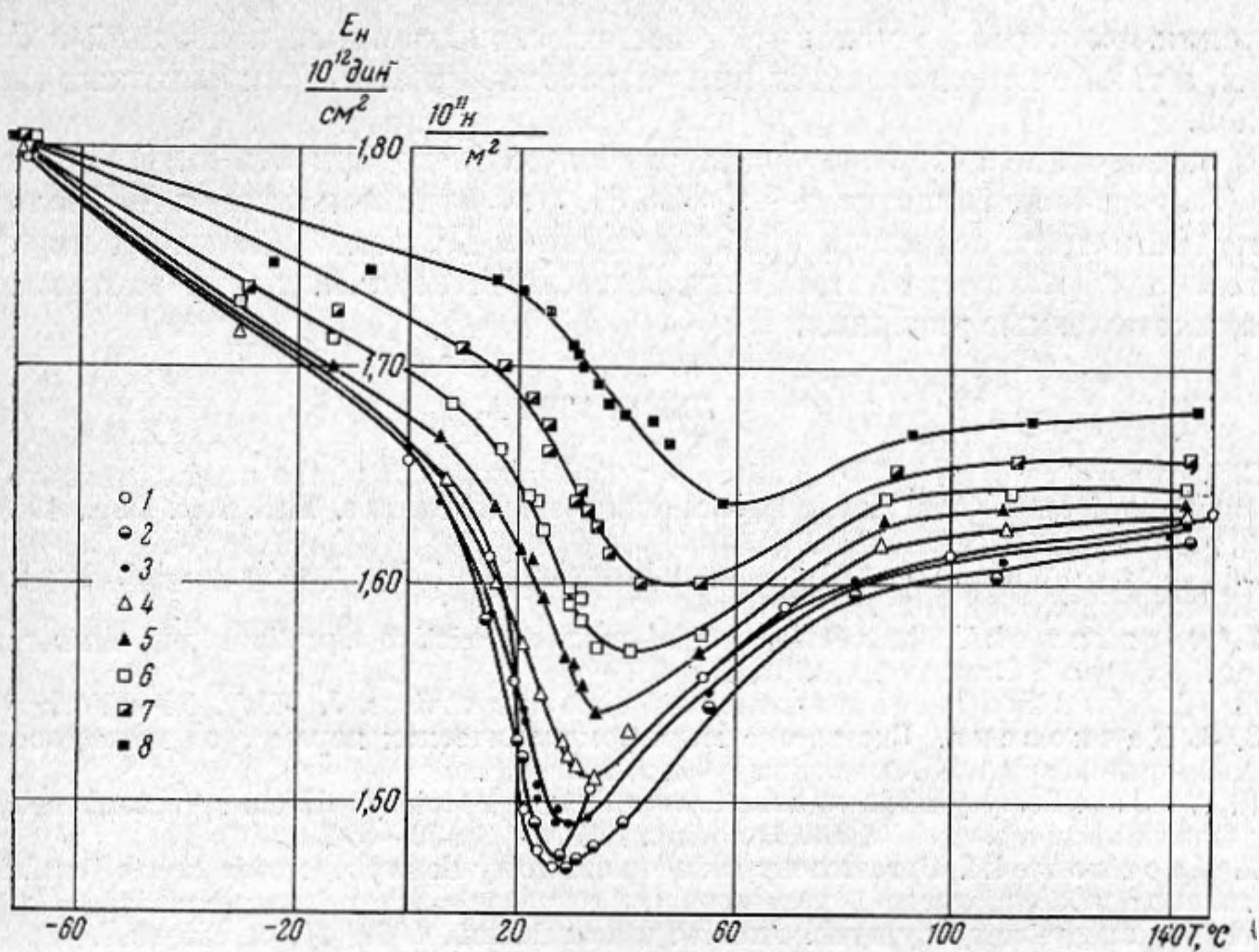


Фиг. 5

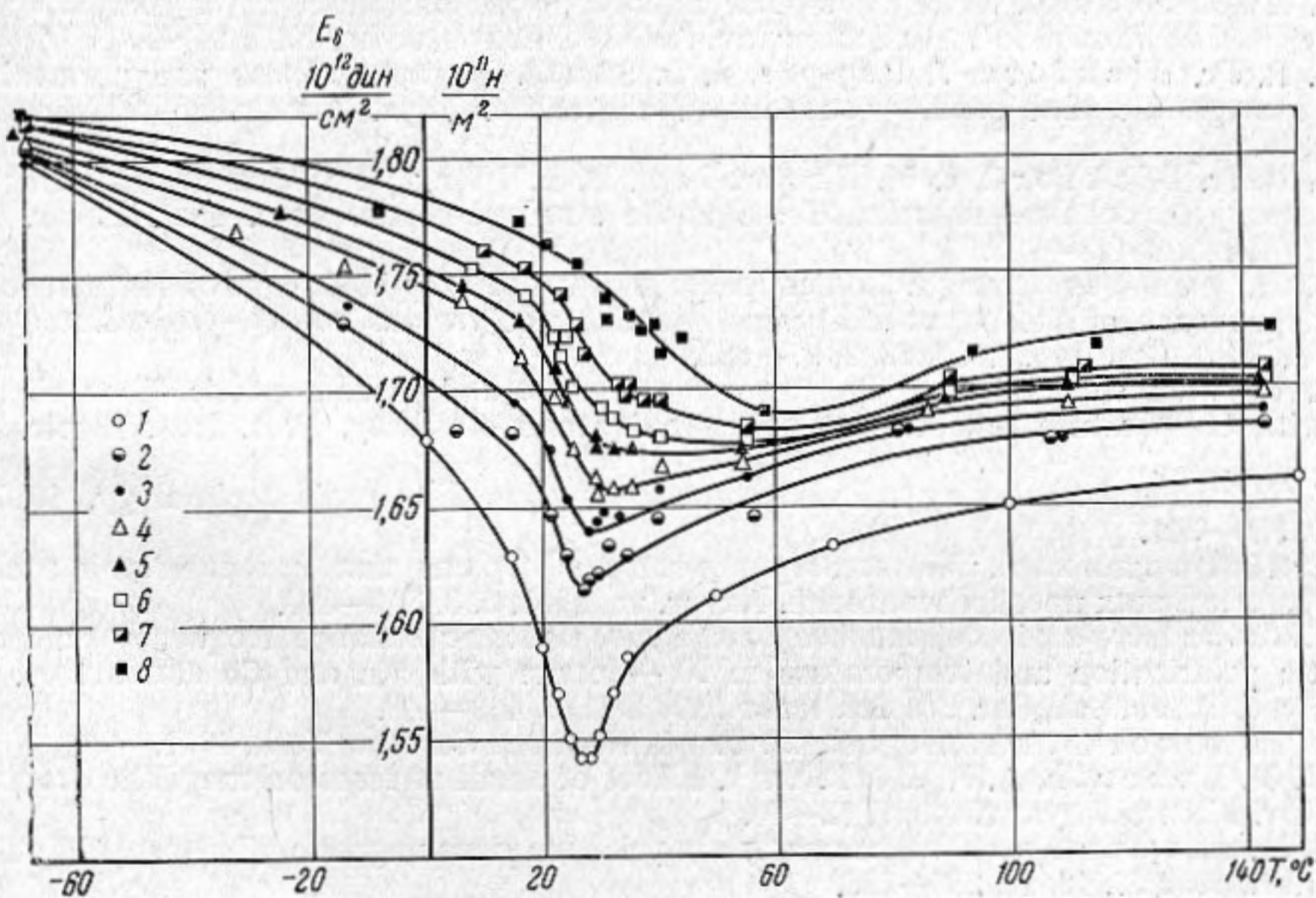


Фиг. 6

Кратко резюмируя полученные результаты, можно сказать, что в данной работе определен полный комплект коэффициентов магнитоэлектрических уравнений для феррита Е-1 в зависимости от подмагничивания и температуры; установлено явление смещения экстремальных точек на температурных кривых k , μ , E , d , h , l и g для кобальт-содержащих ферритов, вызванное добавочной энергией постоянного внешнего магнитного поля; констатировано появление нескольких экстремальных точек на кривых d , h , e и g для феррита Е-1.



Фиг. 7



Фиг. 8

Полученные результаты имеют практическое значение и дают некоторые предпосылки для теоретического истолкования процессов, происходящих в ферромагнетиках с компенсированной при определенной температуре анизотропией. Вместе с результатами исследований гистерезиса [5, 29, 30, 31], исследований при больших мощностях [32], высоких температурах [20] и больших давлениях [32], а также некоторых других исследований [14, 33, 34], полученные результаты дают довольно широкое представление о поведении пьезомагнитных никелевых ферритов с примесью кобальта. Все эти данные могут служить основанием для более углубленного

изучения физического механизма магнитоупругих колебаний в ферритах, а также использоваться при разработке практически полезных материалов.

В заключение автор выражает глубокую благодарность И. П. Голяминой (Акустический институт АН СССР), Л. Филиппиньскому и А. Смолинскому (Институт основных проблем техники Польской Академии наук) и М. Наленчу (Институт автоматки Польской Академии наук) за просмотр работы и полезные указания.

ЛИТЕРАТУРА

1. C. M. van der Burgt. Dynamical physical parameters of the magnetostrictive excitation of extensional and torsional vibrations in ferrites. *Phil. Res. Rep.*, 1953, 8, 2, 91—133.
2. Z. Kaczkowski. Równania magnetostrykcyjne i ich współczynniki. *Rozprawy Elektrotechn.*, 1961, 7, 2, 245—275.
3. Z. Kaczkowski. The coefficients of magnetostrictive equations and their relationship. *Proc. Vibrat. Probl.*, 1961, 2, 4, 457—468.
4. H. W. Katz. *Solid state magnetic and dielectric devices*. J. Wiley, New York, 1959.
5. З. З. Качковски. Гистерезис магнитомеханических параметров магнитоупругого феррита ЕІ. *Акуст. ж.*, 1963, 9, 1, 37—46.
6. R. Wada. Ferrity niklowo-kobaltowe z dużym współczynnikiem sprzężenia magneto mechanicznego. *Archiw. Elektrotechn.*, 1963, 12, 2, 452—454.
7. Z. Kaczkowski. Uproszczony układ pomiarowy do wyznaczania częstotliwości rezonansu mechanicznego i współczynnika sprzężenia magneto mechanicznego k materiałów magnetostrykcyjnych. *Archiw. Elektrotechn.*, 1962, 11, 3, 635—639.
8. Z. Kaczkowski. Układ do wyznaczania współczynnika sprzężenia magneto mechanicznego k i częstotliwości rezonansowej w zakresie od -70 do $+150^{\circ}\text{C}$. *Przegląd Elektron.*, 1963, 4, 5—6, 267—276.
9. Z. Kaczkowski. Extrema współczynników magneto mechanicznych ferrytów niklowych z domieszką kobaltu i manganu. *Archiw. Elektrotechn.*, 1965, 14, 4.
10. L. R. Jr. Bickford, J. Pappis, I. L. Stull. Magnetostriction and permeability of magnetite and cobalt—substituted magnetite. *Phys. Rev.*, 1955, 99, 4, 1210—1214.
11. L. R. Jr. Bickford, I. M. Brownlow, R. F. Penoyer. Magnetocrystalline anisotropy in cobalt—substituted magnetite single crystals. *Proc. Inst. Electr. Eng.*, 1957, 104, 3, 138—248.
12. C. M. van der Burgt. Controlled crystal anisotropy and controlled temperature dependence of the permeability and elasticity of various cobalt—substituted ferrites. *Phil. Res. Rep.*, 1957, 12, 2, 97—122.
13. C. M. van der Burgt. Ferrites for magnetic and piezomagnetic filter elements with temperature independent permeability and elasticity. *Proc. Inst. Electr. Eng.*, 1957, 104, 7, 550—557.
14. C. M. van der Burgt. Piezomagnetic ferrites. *Electronic technology*, 1960, 37, 9, 330—341.
15. И. П. Голямина. Магнитоупругие ферриты как материал для электроакустических преобразователей. *Акуст. ж.*, 1960, 6, 3, 311—320.
16. Z. Kaczkowski. Dependence of the mechanical resonance frequency on magnetic polarization and temperature in Ni—ferrite with Mn and Co admixtures. *Bull. Acad. Polon. Sci., Ser. des Sci. techn.*, 1963, 11, 8, 443—448.
17. R. M. Bozorth. *Ferromagnetism*. D. van Nostrand Co, New York, 1951.
18. R. M. Bozorth, A. J. Williams. Effect of small stresses on magnetic properties. *Rev. Modern Phys.*, 1945, 17, 72—80.
19. C. M. van der Burgt. Ferrocube material for piezomagnetic vibrators. *Phil. Techn. Rev.*, 1956/57, 18, 10, 285—298.
20. Л. И. Ганева, И. П. Голямина. Свойства магнитоупругих ферритов при высоких температурах. *Акуст. ж.*, 1963, 9, 4, 413—417.
21. Z. Kaczkowski. Zjawiska magneto mechaniczne w materiałach magnetostrykcyjnych. *Przegląd Elektron.*, 1961, 2, 3, 256—278.
22. E. Kneeller. *Ferromagnetismus*. Springer Verlag, Berlin, 1962.
23. Z. Kaczkowski. Histereza termiczna przenikalności odwracalnej ferrytów niklowych z domieszkami. *Przegląd Electron.*, 1965, 7.
24. Z. Kaczkowski. Zależności częstotliwości rezonansu mechanicznego od polaryzacji i temperatury w ferrycie niklowym z domieszkami manganu i kobaltu. *Przegląd Elektron.*, 1964, 5, 2, 96—101.
25. Z. Kaczkowski. Zależność modułu sprężystości od polaryzacji magnetycznej i temperatury (efekt ΔE) w ferrytach niklowych z domieszkami manganu i kobaltu. *Przegląd Elektron.*, 1965, 5, 8, 391—405.
26. Z. Kaczkowski. Ekstrema przenikalności i modułów sprężystości, ferrytów Ni—Co—Mn, *Archiw. Elektrotechn.*, 1966, 15, 1.

27. В. Н. Кузнецов. ΔE -эффект и затухание ультразвука в ферритах. Изв. вузов, Физика, 1961, 6, 41—47.
28. В. Н. Кузнецов. ΔE -эффект и внутреннее трение в ферритах на ультразвуковых частотах. Физ. метал. и металловед., 1965, 18, 1, 123—128.
29. C. M. van der Burgt. Ferroxcube 7A1 and 7A2, new ceramic piezomagnetic materials for ultrasonic power transducers. Phil. Matron., 1958, 15, 273—304.
30. Z. Kaczkowski. Pętle histerezy współczynnika sprężenia magnetomechanicznego k niektórym ferrytów magnetoskrycyjnych. Archiw. Elektrotechn., 1962, 11, 2, 373—378.
31. Z. Kaczkowski. The influence of the polarising field on value of magnetomechanical coefficient at remanence in magnetostrictive ferrite E1. Bull. Acad. Polon. Sci., Sér. Sci. Techn., 1963, 11, 1, 41—44.
32. И. П. Голямина, В. К. Чулкова. Свойства магнитострикционных ферритов при больших амплитудах возбуждающей индукции и механического напряжения. Акуст. ж., 1964, 10, 3, 276—283.
33. O. Henkel, I. Kalning, H. J. Müller-Dittman. Wandlerferrite für mechanische filter. Hermsdorfer Techn. Mitt., 1963, 9, 240—246.
34. A. P. Greifer. Piezomagnetism of biased ferrites. J. Appl. Phys., 1964, 35, 3, P. 2, 1065—1066.

Институт основных проблем техники
Польской Академии наук
Варшава

Поступила в редакцию
30 июля 1965 г.