

УДК 534.232:538.652

## АМПЛИТУДНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СВОЙСТВ МАГНИТОСТРИКТОРОВ И ОГРАНИЧЕНИЕ ИЗЛУЧАЕМОЙ В ЖИДКОСТЬ МОЩНОСТИ

*Л. И. Ганева, И. П. Голямина*

Экспериментально исследована зависимость интенсивности излучения в жидкость от уровня возбуждения для магнитострикционных преобразователей из никеля, пермендюра, альфера, феррита при различных подмагничиваниях; оценено влияние магнитострикционной и механической нелинейности на предельную излучаемую мощность.

Нелинейное поведение магнитострикционных материалов, т. е. связанная с самой природой доменных процессов зависимость их свойств от амплитуды, является важным фактором при определении применимости материалов для конкретных целей, при расчете реальных магнитострикционных преобразователей, а также при сравнении различных материалов между собой. Для преобразователей, работающих с относительно большим сопротивлением акустической нагрузки (например, излучающих акустическую энергию в жидкую среду) нелинейность магнитострикционных свойств обуславливает такую важную характеристику, как предельная мощность и интенсивность излучения [1]. Предельной интенсивности преобразователей из электромеханически активных материалов в литературе уделяется в последние годы большое внимание (например, [2—6]). При этом для магнитострикционных преобразователей проводится анализ факторов, ограничивающих эту величину, сообщаются некоторые количественные оценки. Важнейшая роль магнитострикционной нелинейности в ограничении мощности излучения при большой акустической нагрузке отмечается практически всеми авторами. Однако экспериментальных данных по этому вопросу пока еще очень мало. Среди металлических материалов в этом плане изучались никель [2] и никель-кобальтовые сплавы [7], для которых калориметрическим методом на стержневых образцах определялась интенсивность излучения в твердую согласованную нагрузку. Несколько подробнее изучены магнитострикционные ферриты [1, 3, 8], нелинейные свойства которых проявляются особенно сильно ввиду их низкой индукции насыщения.

Основной задачей данной работы было экспериментальное изучение нелинейной зависимости давления  $p$  в поле преобразователей из различных магнитострикционных материалов от уровня возбуждения и определение предельной интенсивности излучения этих преобразователей  $I_{\max}$ . Преобразователи излучали непосредственно в воду, уровень возбуждения характеризовался амплитудой переменной индукции  $B_m$ . Объектом исследований служили преобразователи из никеля НП-2, пермендюра 50КФ, альфера 12-Ю [9], феррита 21СПА [3] с резонансной частотой 22—25 кгц (свойства материалов см. в [10]). Двухстержневые сердечники преобразователей с замкнутым магнитопроводом имели одинаковую форму и размеры с отношением площади сечения стержня к площади накладки 1:2. Они набирались из пластин толщиной 0,2 мм; пластины никеля имели тол-

щину 0,1 мм. Термообработка соответствовала обычно применяемой для данных материалов.

Звуковое давление измерялось в зависимости от  $B_m$  на резонансной частоте преобразователя в максимуме его характеристики направленности калиброванным гидрофоном. По величине амплитуды давления  $p_m$  с помощью известной простой формулы вычислялась интенсивность излучения  $I$ :

$$(1) \quad I = \frac{p_m^2}{2\rho c} \frac{4\pi r^2}{2S_n} \frac{1}{\kappa},$$

где  $\rho c$  — волновое сопротивление жидкости,  $r$  — расстояние от центра излучения до точки, в которой измерялось давление,  $S_n$  — площадь излучающих накладок,  $\kappa$  — коэффициент осевой концентрации.

Пользуясь введенной в [11] величиной магнитоэстрикционного напряжения  $\sigma_m$ , являющегося функцией возбуждающей индукции  $B$  (в линейном или «квазилинейном» случае  $\sigma_m = aB$ , где  $a$  — широко применяемая магнитоэстрикционная константа), амплитуду звукового давления  $p_m$  можно выразить как

$$(2) \quad p_m = \sigma_{m_m} \frac{S_{ст}}{S_n} \cos kl_n \times \eta_{ма} \frac{\sqrt{S_n/2\pi}}{r},$$

где  $\sigma_{m_m}$  — амплитуда  $\sigma_m$ ,  $S_{ст}$  — площадь сечения стержневой части сердечника,  $kl_n$  — волновая длина накладки,  $\eta_{ма}$  — механоакустический КПД преобразователя. Из (2) следует, что нелинейная зависимость  $p_m$  от  $B_m$  в основном определяется соответствующей зависимостью  $\sigma_{m_m}$  (некоторую роль может играть и амплитудная зависимость  $\eta_{ма}$ ), а предельная интенсивность излучения обусловлена максимальным значением амплитуды  $\sigma_{m_{max}}$ . Зависимость  $\sigma_{m_m}$  от  $B_m$  для никеля приводилась в работе [2], где значение  $\sigma_{m_m}$  вычислялось по интенсивности излучения на резонансе. В данной работе на всех образцах преобразователей зависимость  $\sigma_{m_m}$  от  $B_m$  определялась в квазистатическом режиме возбуждения (частота 1 кГц) в отсутствие нагрузки, т. е. в воздухе. Значение  $\sigma_{m_m}$  вычислялось по измеренной калиброванным датчиком амплитуде колебаний торцевых поверхностей сердечников  $\xi_m$  с помощью выражения:

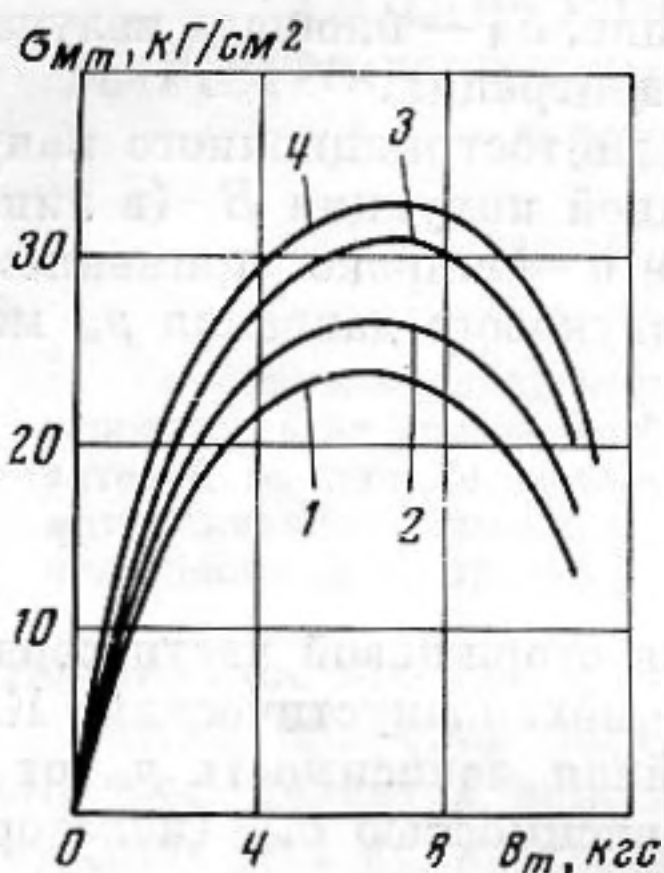
$$(3) \quad \sigma_{m_m} = \frac{2\xi_m E}{l},$$

где  $l$  — длина активного участка сердечника,  $E$  — модуль Юнга материала преобразователя, величина которого мало зависит от амплитуды [10].

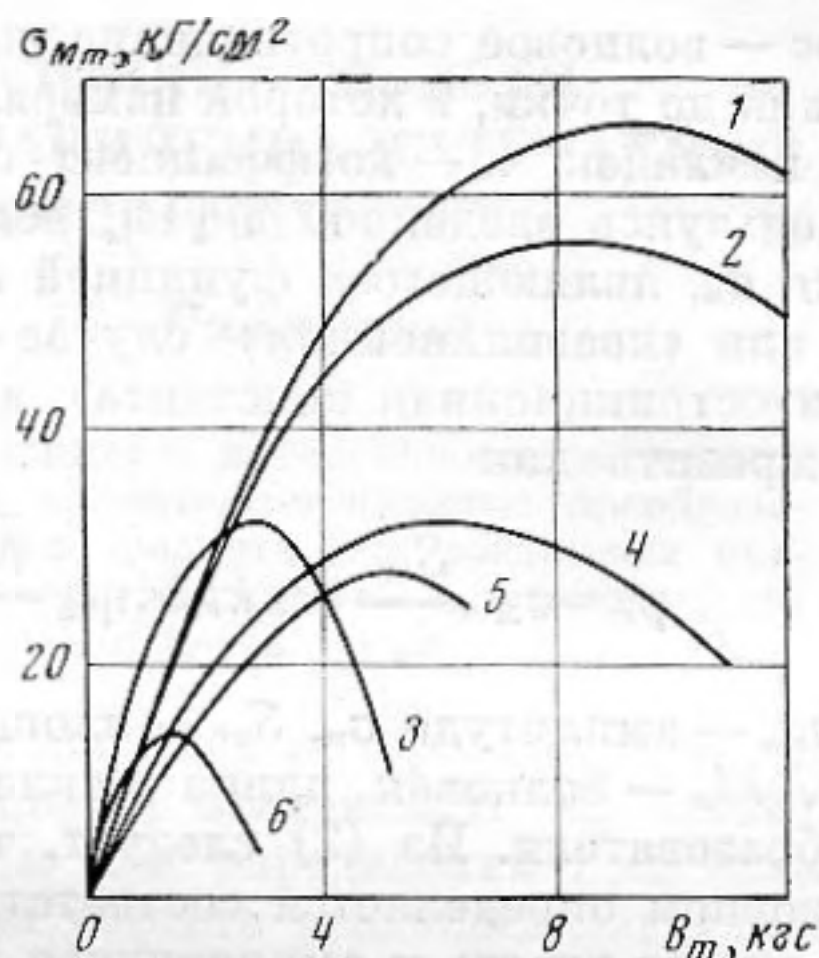
Как при резонансных измерениях в воде, так и при квазистатических в воздухе зависимость возбуждающей индукции от времени всегда имела синусоидальную форму, что обеспечивалось большим запасом мощности генератора, его малым выходным сопротивлением, а также применением специального согласующего контура. Амплитуда индукции  $B_m$  изменялась от нескольких гаусс до значений, близких к индукции насыщения  $B_s$ ; величина ее определялась с помощью специальной обмотки на сердечнике. Форма и величина возбуждающего магнитного поля  $H$  определялись по форме и величине переменного тока. С возрастанием  $B_m$  форма звукового давления в воде и колебательного смещения в воздухе приобретала, как и форма магнитного поля, искаженный характер. При этом за величину  $p_m$  и  $\xi_m$  принималась амплитуда первой гармоники указанных величин, для чего в соответствующих измерительных цепях использовались третьоктавные фильтры. Следовательно, и величины  $\sigma_m$  и  $I$  определялись по первой гармонике. Исследование свойств материалов и преобразователей по основной частоте представлялось целесообразным как для возможности сопоставления с теоретическим рассмотрением, так и с точки зрения практической пользы, так как в большинстве случаев и в гидроакустике, и при

технологических применениях мощного ультразвука главную роль играет именно компонента с основной частотой.

Как в воде, так и в воздухе возбуждение производилось в импульсном режиме, причем длительность импульса равнялась десяти — двадцати периодам основной частоты. Величины  $V_m$ ,  $p_m$ ,  $\xi_m$  измерялись с помощью калиброванных осциллографов. Импульсный режим возбуждения применялся с целью подавления двух основных мешающих факторов: он позволял уменьшить нагревание сердечника при работе его в воздухе и повысить порог кавитации при работе в воде. Для устранения нагревания сер-



Фиг. 1. Зависимость амплитуды первой гармоника магнито-стрикционного напряжения  $\sigma_{m1}$  от амплитуды возбуждающей индукции  $V_m$  для образца из сплава 12-Ю при различных значениях поля подмагничивания  $H_0$ : 1 —  $H_0 = 10$  э; 2 — 15; 3 — 30; 4 —  $H_0 = 40 \div 60$  э



Фиг. 2. Зависимость амплитуды первой гармоника магнито-стрикционного напряжения  $\sigma_{m1}$  от амплитуды индукции  $V_m$  для образцов из различных материалов при подмагничивании, соответствующем максимуму магнито-стрикционной постоянной  $H_{0a}$ . 1 — пермендюр, 2 — сплав 65К, 3 — никель, 4 — альфер 12-Ю, 5 — альфер 14-Ю, 6 — феррит

дечника применялось, кроме того, интенсивное воздушное охлаждение, а полное подавление кавитации достигалось работой в воде при повышенном гидростатическом давлении (до 20 ат). Отсутствие кавитации, т. е. сохранение линейных свойств окружающей среды, тщательно контролировалось по сигналу со специального дополнительного гидрофона, расположенного в ближнем поле излучателя, а также по показаниям специального кавитометра. Наряду с нагреванием и кавитацией выявлению истинной магнито-стрикционной нелинейности образцов могла помешать потеря продольной устойчивости при больших амплитудах колебаний. Для исключения этого эффекта толщина сердечников была сделана достаточно большой, а отдельные пластины набора склеены между собой по всей плоскости.

Измерения производились при различных значениях постоянного поля подмагничивания  $H_0$ , находящихся в интервале от 5—10 до 60—70 э. Поле  $H_0$  создавалось постоянным током, протекавшим по той же обмотке, что и ток возбуждения.

В выражение (2) для  $p_m$  входит величина  $\eta_{ma}$ , которую можно представить как  $\eta_{ma} = 1 - Q_n / Q_{мп}$ , где  $Q_{мп}$  — механическая добротность ненагруженного преобразователя,  $Q_n$  — добротность при излучении в воду. Величина  $Q_n$  определяется в основном сопротивлением нагрузки и в отсутствие кавитации практически постоянна. Она измерялась по частотной характеристике звукового давления или по частотной характеристике потребляе-

Материал	$\sigma_{m \max}$ , кг/см <sup>2</sup>	$\lambda_S \cdot 10^8$	$B_S \cdot 10^{-3}$ , эс	$E \cdot 10^{-6}$ , кг/см <sup>2</sup>	$a \cdot 10^{-4}$ , дин/см <sup>2</sup> ·эс	$\frac{\lambda_S}{2} \cdot E$ , кг/см <sup>2</sup>	$a B_S$ , кг/см <sup>2</sup>
Никель	35	-37	6,1	2,15	1,9	40	120
Пермендюр	75	+70	24,0	2,35	1,8	82	430
Сплав 65К	60	+90	22,0	2,0	1,4	90	300
Альффер 12-Ю	33	+40	16,0	1,65	0,65	34	110
Альффер 14-Ю	30	+40	12,0	1,7	0,8	34	90
Феррит	20	-26	3,2	1,75	2,0	23	65

мой преобразователями мощности при работе в воде. Величина  $Q_{\text{мп}}$  обусловлена собственными потерями преобразователя и имеет заметную амплитудную зависимость [12]. Эта зависимость определялась на всех исследованных образцах для различных  $H_0$ , причем значения  $Q_{\text{мп}}$  соотносились с амплитудой механического напряжения в пучности колебаний на резонансе —  $\sigma_{\text{пм}}$ . Величина  $\sigma_{\text{пм}}$  вычислялась по амплитуде колебаний  $\xi_m$ , измеренной бесконтактным виброметром на резонансной частоте (также по первой гармонике), а значение  $Q_{\text{мп}}$  определялось по спадаанию амплитуды резонансных колебаний образца после выключения возбуждающего поля. Возбуждение в этом случае производилось одиночными импульсами длительностью до 20 мсек с частотным заполнением, соответствующим резонансу преобразователя.

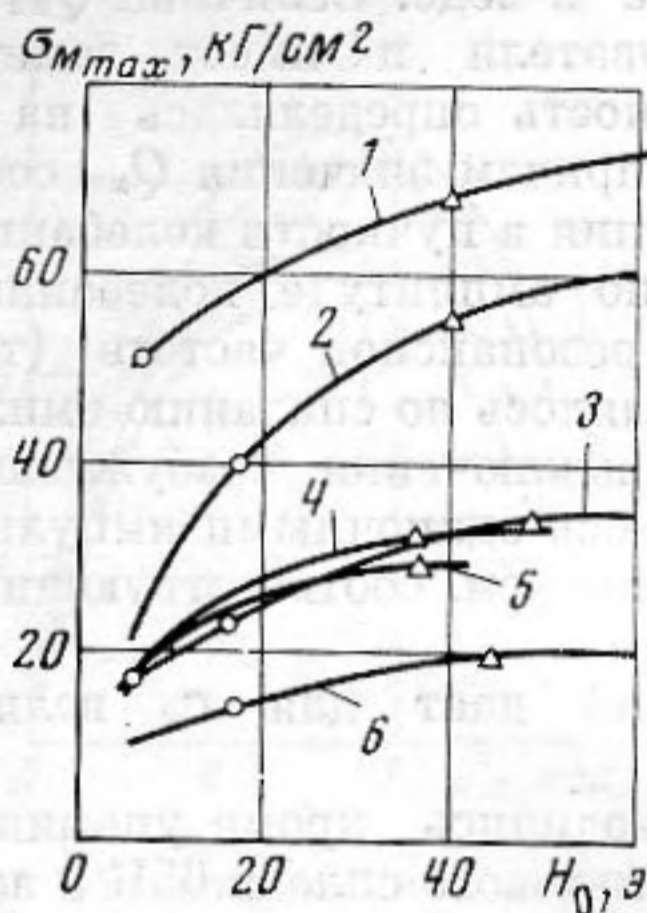
Оценка точности проводившихся измерений дает для  $\sigma_m$  величину  $\leq 10\%$ , для  $Q_{\text{мп}}$  —  $20\%$ , для  $p_m$  —  $20\%$ .

Измерения зависимости  $\sigma_{\text{пм}}$  от  $B_m$  производились кроме упомянутых выше материалов на образцах из железо-кобальтового сплава 65К и альффера 14-Ю. Результаты измерений показывают, что графики этой зависимости у всех материалов при всех значениях  $H_0$  имеют характерный вид кривых с максимумом (пример для 12-Ю дан на фиг. 1). Положение максимума на оси абсцисс соответствует амплитуде  $B_m \approx B_S / 2$  (фиг. 1, 2), а само максимальное значение  $\sigma_{\text{пм}} = \sigma_{m \max}$  — возрастает с увеличением  $H_0$  (фиг. 3, 1). Из экспериментальных данных следует, что для получения большой интенсивности излучения необходимо применять повышенное поле подмагничивания, значительно превосходящее обычно рекомендуемое поле  $H_{0к}$ , соответствующее максимуму коэффициента магнитомеханической связи при малых амплитудах. На кривых фиг. 3 значения  $H_{0к}$  отмечены кружочком; ромбиками отмечены значения  $H_{0а}$ , соответствующие максимуму константы  $a$ . Поле  $H_{0а}$ , к которому относятся данные фиг. 2, можно считать приемлемым для работы излучателей с большой интенсивностью, так как при дальнейшем увеличении  $H_0$  величина  $\sigma_{m \max}$  возрастает незначительно (фиг. 3). В табл. 1 приведены наибольшие достигнутые в процессе исследований значения  $\sigma_{\text{пм}}$ , соответствующие полю  $H_0 = 60-70$  э —  $\sigma_{m \max}$ . Там же представлены параметры, определяющие предельные возможности исследованных материалов — магнитострикция насыщения  $\lambda_S$  и индукция насыщения  $B_S$ , а также модуль Юнга  $E$  вблизи насыщения и магнитострикционная константа  $a$  при  $H_{0а}$  по данным [10].

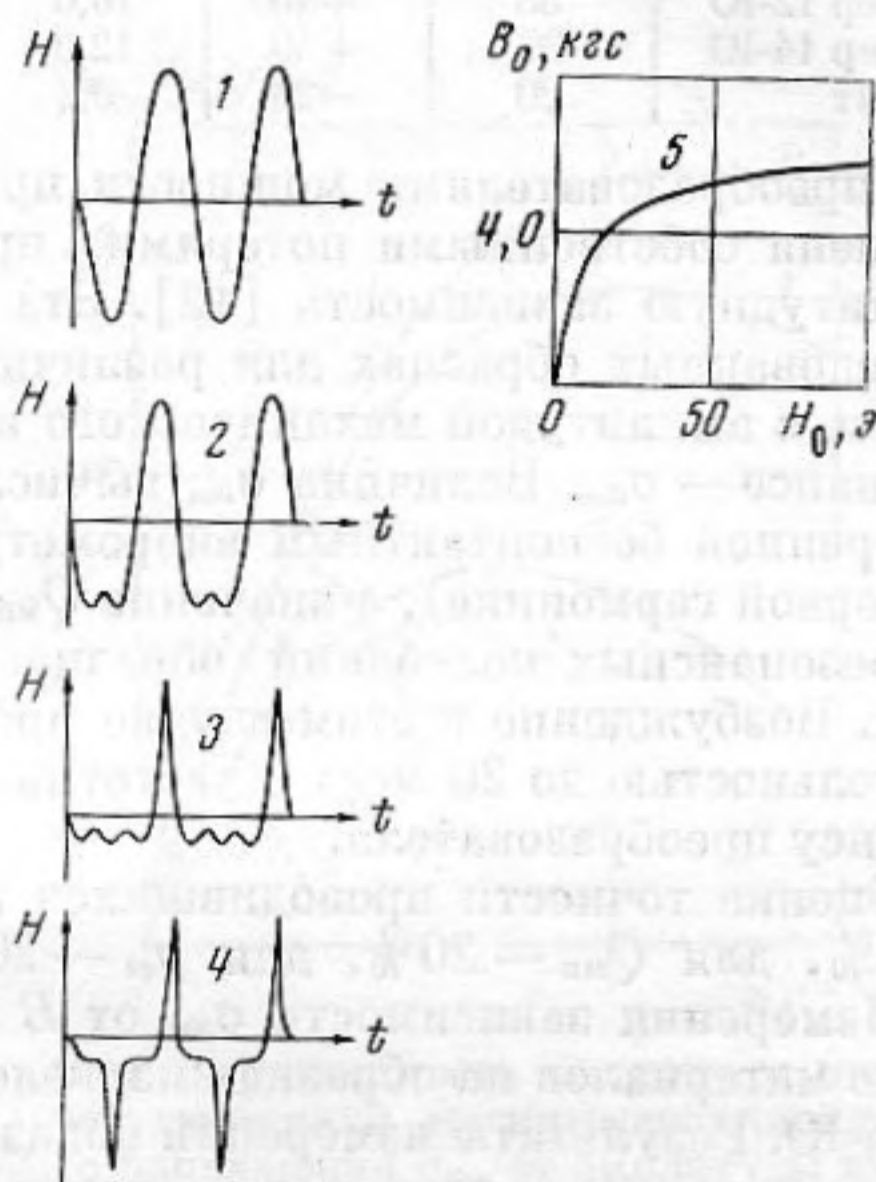
По данным табл. 1 видно, что достигнутые значения  $\sigma_{m \max}$  очень близки к предельным магнитострикционным напряжениям, оцениваемым как  $\lambda_S / 2E$ . Для сплава 12-Ю предельное значение можно считать достигнутым, что видно и из фиг. 1 и 3, где рост  $\sigma_{m \max}$  с  $H_0$  при  $H_0 > 40$  э прекращается. Лишь у сплава 65К применявшиеся значения  $H_0$  были недостаточны для получения близких к предельным значений  $\sigma_m$ , что объясняется большой индукцией насыщения и относительной магнитной жесткостью этого материала (начальная магнитная проницаемость его составляет 150,

а оптимальный коэффициент связи 0,30 по сравнению с соответствующими значениями 700 и 0,54 для пермендюра). Таким образом, полученные данные подтверждают правомерность оценки предельного магнитоэстрикционного напряжения по величине  $\lambda_s$ . При сравнении материалов по предельным возможностям с учетом реально достижимых значений  $H_0$  можно пользоваться и критерием  $aV_s$ , предложенным ранее в [1].

Как уже упоминалось, при проведении измерений подмагничивание оценивалось по величине  $H_0$ , исследования зависимости постоянной индукции  $B_0$  от  $V_m$  не проводились. Однако об уменьшении  $B_0$  с ростом  $V_m$ ,



Фиг. 3. Зависимость максимальных значений амплитуды первой гармоники магнитоэстрикционного напряжения  $\sigma_{m\max}$  от поля подмагничивания  $H_0$  для образцов из различных материалов. 1 — пермендюр, 2 — сплав 65К, 3 — никель, 4 — альфер 12-Ю, 5 — альфер 14-Ю, 6 — феррит



Фиг. 4. Форма возбуждающего поля  $H$  при различных значениях амплитуды синусоидальной возбуждающей индукции  $V_m$  и поле подмагничивания  $H_{0k}$  для образца никеля. 1 —  $V_m = 400$  Гс, 2 — 2100, 3 — 3600; 4 —  $V_m = 5400$  Гс, 5 — основная кривая намагничивания для никеля

отмечавшемся в работе [2], косвенно можно судить по изменению формы возбуждающего поля  $H$  в образце из никеля, представленной на фиг. 4. При малых значениях  $V_m$  и при  $V_m = 0$  значению  $H_{0k}$  соответствует  $B_0 = 3600$  Гс. С ростом  $V_m$  искажение формы  $H$  можно сопоставить с периодическим движением по частотной петле гистерезиса вдоль основной кривой намагничивания: отрицательный полупериод  $V_m$ , соответствующий крутому участку кривой намагничивания, характеризуется малым изменением  $H$ , в то время как положительный полупериод на пологом участке кривой вблизи насыщения дает при таком же изменении  $V_m$  значительно большее изменение  $H$ . При возрастании  $V_m$  от 400 до 3600 Гс асимметрия формы  $H$  увеличивается, что свидетельствует о смещении рабочей точки к более крутому участку, т. е. к меньшим значениям  $B_0$ ; при  $V_m = 5400$  Гс кривая становится вновь почти симметричной, что можно ожидать при приближении  $B_0$  к нулю. О практическом исчезновении подмагничивания при этом значении  $V_m$  свидетельствует и уменьшение определяемого по первой гармонике значения  $\sigma_m$  до 10% от первоначального значения при сильном возрастании второй гармоники. Аналогичные зависимости наблюдались и на образцах из других материалов.

Результаты измерений преобразователей при резонансном двустороннем излучении в воду представлены в табл. 2, 3 и на фиг. 5. В табл. 2 дана

Таблица 2

Материал	$f_p$ , кгц	$Q_n$	$\eta_{ма}$ , %	$\eta_{эа}$ , %	Материал	$f_p$ , кгц	$Q_n$	$\eta_{ма}$ , %	$\eta_{эа}$ , %
Никель	22,8	9	86	65	Альффер 12-Ю	23,3	7	94	75
Пермендюр	24,7	9	94	75	Феррит	25,0	8	97	85

Таблица 3

Материал	$H_0$ , э	$I_{\max \text{ эксп.}}$ , вт/см <sup>2</sup>	$I_{\max \text{ расч.}}$ , вт/см <sup>2</sup>	$Q_{мп}$	Материал	$H_0$ , э	$I_{\max \text{ эксп.}}$ , вт/см <sup>2</sup>	$I_{\max \text{ расч.}}$ , вт/см <sup>2</sup>	$Q_{мп}$
Никель	13	14	19	50	Альффер 12-Ю	12	23	26	110
	45	45	45	76		36	36	48	160
	60	52	58	80		60		60	180
Пермендюр	12	25	190	135	Феррит	20	7	8	
	36	80	240	165		26	10	11	
	60		340	180		60		21	

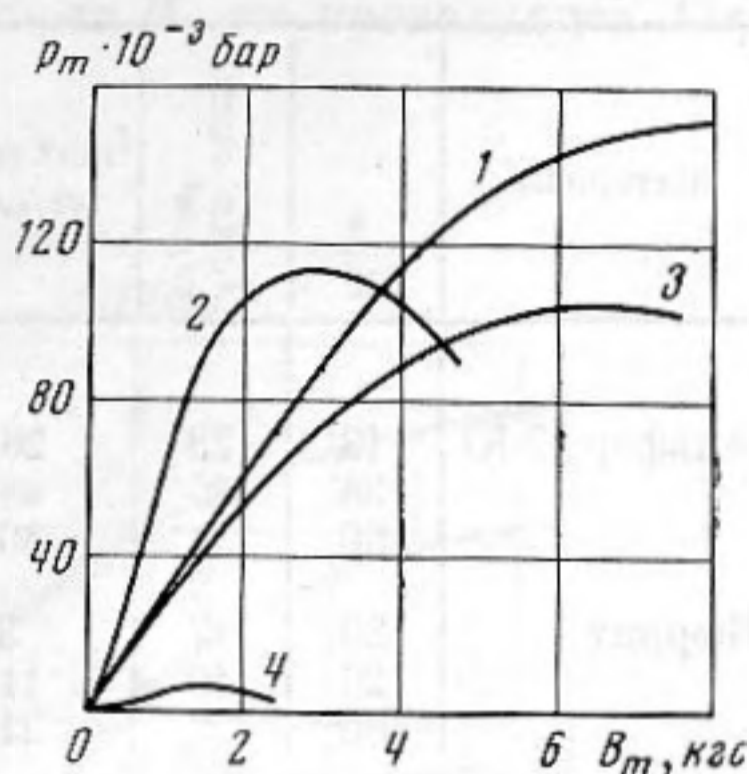
резонансная частота  $f_p$ , добротность  $Q_n$ , электроакустический ( $\eta_{эа}$ ) и механоакустический ( $\eta_{ма}$ ) КПД, определенные при  $H_{0а}$  и  $\sigma_{пм} \approx 150-200$  кГ/см<sup>2</sup>.

Кривые зависимости звукового давления  $p_m$  от  $B_m$  на фиг. 5 по форме повторяют кривые  $\sigma_{пм}$  в функции  $B_m$ , с максимумом при  $B_m \approx B_s/2$ . То же сходство наблюдалось и при других значениях  $H_0$ . Лишь для преобразователя из пермендюра максимальные значения  $p_m$  не достигались, так как вследствие недостаточной мощности генератора амплитуда возбуждающей индукции ограничивалась значениями 6—7 кгс. Интересно отметить, что в отсутствие статического давления значения  $p_m$  всегда ограничивались уровнем, соответствующим интенсивности излучения  $\sim 20$  вт/см<sup>2</sup> из-за возникшей кавитации. В табл. 3 приведены максимальные для каждого  $H_0$  значения интенсивности —  $I_{\max \text{ эксп.}}$ , вычисленные с помощью (1) по измеренным значениям  $p_m$ . Там же даны величины  $I_{\max \text{ расч.}}$ , рассчитанные по соответствующим значениям  $\sigma_{пм \max}$  с помощью (2) и (1). Использованные при расчете значения  $\eta_{ма}$  вычислялись с учетом зависимости  $Q_{мп}$  от подмагничивания и от амплитуды механического напряжения в пучности колебаний —  $\sigma_{пм}$ , причем величина  $\sigma_{пм}$  определялась как произведение соответствующего значения  $\sigma_{пм \max}$  на  $Q_n$ . Значения  $Q_{мп}$  также даны в табл. 3. Как показали измерения [10], значение  $Q_{мп}$  у всех материалов заметно увеличивалось с ростом  $H_0$  (фиг. 6), а существенная амплитудная зависимость  $Q_{мп}$  наблюдалась лишь у образцов из феррита и никеля, у других материалов добротность слабо изменялась с амплитудой (пример для  $H_0 = H_{0а}$  дан в работе [12] на фиг. 3). При  $\sigma_{пм} > 100$  кГ/см<sup>2</sup> наибольшей добротностью отличался пермендюр, так как высокая начальная добротность ферритового образца быстро уменьшалась с амплитудой. Следует отметить, что даже у образцов с сильно выраженной зависимостью  $Q_{мп}$  от  $\sigma_{пм}$  эта зависимость не сказывалась существенно на величине  $\eta_{ма}$  (фиг. 7).

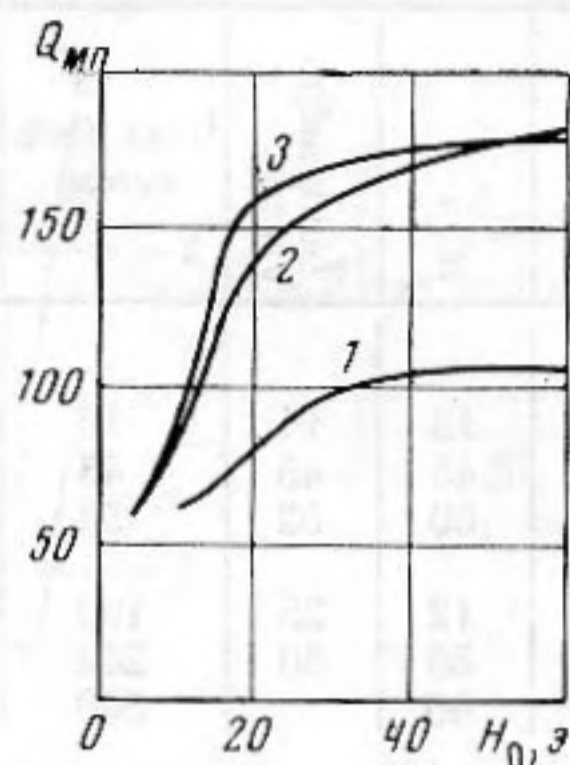
Данные табл. 3 указывают на хорошее согласие экспериментальных и расчетных значений максимальной интенсивности излучения в воде для всех преобразователей, кроме пермендюрового, у которого наибольшее достигнутое звуковое давление не являлось предельным, обусловленным магнотриксционной нелинейностью. Из этих данных следует также, что в условиях часто встречающейся на практике нагрузки ( $Q_n \approx 10$ ) магнотриксционные излучатели обеспечивают достаточно большую интенсив-

ность излучения. Для оценки излучаемой мощности, приходящейся при этих условиях на единицу площади сечения активного участка стержневых преобразователей, приведенные в табл. 3 значения следует увеличить вдвое.

Амплитуда механического напряжения в пучности колебаний при максимальных значениях  $\sigma_{m \max}$  и рассмотренных условиях нагрузки ( $Q_n$  в табл. 2) не превышает для сердечников из металлических материалов 400—700  $\kappa\Gamma/\text{см}^2$ , а для ферритового — 160  $\kappa\Gamma/\text{см}^2$  (соответствующая

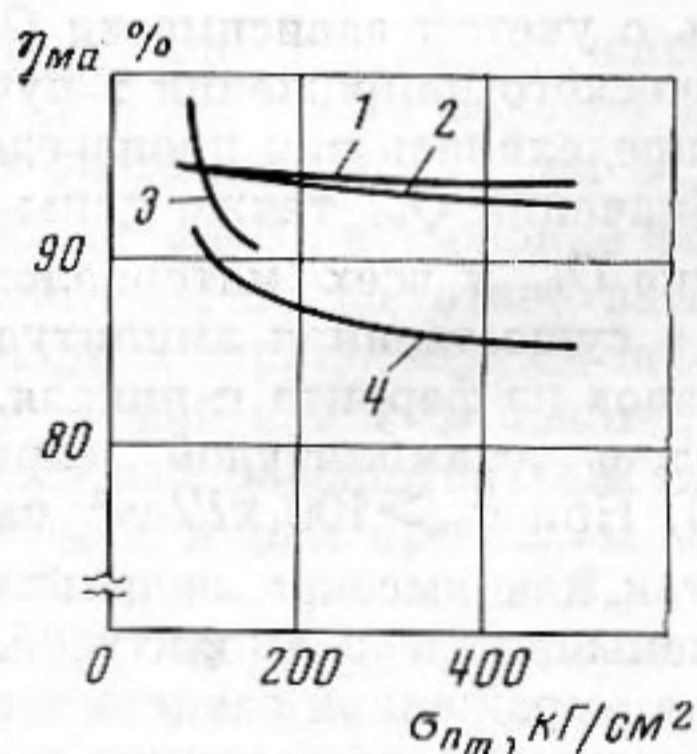


Фиг. 5. Зависимость амплитуды звукового давления  $p_m$  от амплитуды возбуждающей индукции  $B_m$  для образцов из различных материалов при двустороннем излучении в воду и  $H_0 = H_{0a}$ . 1 — пермендюр, 2 — никель, 3 — альфер 12-Ю, 4 — феррит



Фиг. 6. Зависимость механической добротности преобразователей  $Q_{мп}$  от поля подмагничивания  $H_0$  при  $\sigma_{пм} = 100 \kappa\Gamma/\text{см}^2$  и амплитуде переменной индукции  $B_m \approx 10-40 \text{ гс}$ . 1 — никель, 2 — пермендюр, 3 — альфер 12-Ю

амплитуда колебаний 5—7 и 3  $\text{мк}$ ). Это означает, что преобразователи из пермендюра, альферов, сплава 65К при достижении предела по магнито-стрикционной нелинейности были далеки от пределов по прочности и текучести, составляющих 5000—6000  $\kappa\Gamma/\text{см}^2$ , т. е. были существенно перегружены с точки зрения совмещения ограничивающих мощность факторов. Преобразователь из никеля с пределом по текучести, равным



Фиг. 7. Зависимость механоакустического КПД —  $\eta_{ма}$  преобразователей из различных материалов от амплитуды резонансного механического напряжения в пучности колебаний  $\sigma_{пм}$  при  $H_0 = H_{0a}$ . 1 — пермендюр, 2 — альфер 12-Ю, 3 — феррит, 4 — никель

1000  $\kappa\Gamma/\text{см}^2$  [10], также был перегружен, но в меньшей степени. Для преобразователя из феррита пределы по нелинейности и прочности [3] оказались совмещенными. Следует отметить, что приводимые здесь значения прочности металлических материалов получены в статическом режиме, для более точных оценок необходимы сведения об усталостной динамической прочности.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что для изготовления наиболее мощных преобразователей, предназначенных для излучения в некавитирующую жидкость, следует рекомендовать пермендюр. Дополнительным достоинством таких преобразователей является сохранение низкого уровня механических потерь при больших амплитудах колебаний. Достаточно высокую интенсивность могут обеспечить и преобразователи из альфера. Преобразователи из ферритов целесообразно использовать при такой нагрузке в случаях, когда требуемая интенсивность не превышает 10—15 вт/см<sup>2</sup>.

Авторы благодарят З. Н. Булычеву за помощь в изготовлении образцов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. П. Голямина, В. К. Чулкова. Свойства магнитоотрицательных ферритов при больших амплитудах возбуждающей индукции и механического напряжения. Акуст. ж., 1964, 10, 3, 276—283.
2. R. B. Whyte. Utilization of magnetostrictive materials in generating intense sound. J. Acoust. Soc. America, 1961, 33, 6, 725—733.
3. Источники мощного ультразвука под ред. Л. Д. Розенберга. М., «Наука», 111—146.
4. E. A. Neppiras. Some remarks on the maximum power-handling capacity of resonant electromechanical transducers. Acoustica, 1967—1968, 19, 1, 54—56.
5. J. Kikuchi. The theoretical limit of mechanical output power available from magnetostriction vibrators. IEEE trans. on Sonics and Ultrasonics, 1968, 15, 1, 1—12.
6. R. Woollett. Power limitations of sonic transducers. IEEE trans. on Sonic and Ultrasonics, SU-15, 1968, № 4, 218—229.
7. E. A. Neppiras. New magnetostrictive materials and transducers. I, II. J. Sound Vib., 1968, 88, 408—456.
8. Л. Н. Сыркин. Пьезомагнитная керамика. Л., «Энергия», 1972.
9. О. Н. Альтгаузен, Л. С. Безуглая, З. Н. Булычева, О. В. Любецкая. Магнитные свойства сплавов для магнитоотрицательных преобразователей. Акуст. ж., 1966, 12, 3, 283—288.
10. З. Н. Булычева, Л. И. Ганева, И. П. Голямина. Отечественные материалы для магнитоотрицательных преобразователей. Вопросы судостроения, серия Акустика, 1974, 1, 24—37.
11. Л. Я. Гугин. Магнитоотрицательные излучатели и приемники, ЖТФ, 1945, 15, 12, 924—941.
12. В. Н. Валуйев, Л. И. Ганева, И. П. Голямина. Сравнение свойств преобразователей из различных магнитоотрицательных материалов. Акуст. ж., 1970, 16, 1, 32—36.

Акустический институт  
Академии наук СССР

Поступила  
27 ноября 1973 г.