

DOI: 10.47026/1810-1909-2022-3-114-127

УДК 681.586.785:621.3.013.62

ББК 32.873

С.В. ЯНКЕВИЧ, Г.В. МАЛИНИН, В.С. АБРУКОВ

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ИЗЛУЧАЕМОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ НА ТЕПЛОАГРЕГАТАХ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОТИВОНАКИПНОГО ЭФФЕКТА

Ключевые слова: ультразвуковой генератор, теплоагрегат, противонакипной эффект, излучаемая акустическая мощность, магнитострикционный преобразователь, амплитуда магнитострикции, индукция насыщения, подмагничивание.

В работе предложен способ увеличения излучаемой акустической мощности ультразвуковых (акустических) противонакипных устройств, обеспечивающий их эффективность. Из литературных источников известна формула определения удельной акустической мощности магнитострикционного преобразователя, зависящая от его физических характеристик. Однако на практике эта формула может быть применима только для определения расчетной теоретической предельной акустической мощности, которую может излучать спроектированный магнитострикционный преобразователь с заданными конструктивными и геометрическими параметрами. В работе приведена формула определения практической излучаемой акустической мощности магнитострикционного преобразователя на теплоагрегатах с учетом режима работы ультразвукового генератора и способа возбуждения магнитострикционного преобразователя. С использованием приведенных формул выполнена оценка излучаемой акустической мощности при импульсном режиме работы ультразвукового генератора в сравнении с теоретически возможной излучаемой мощностью. Показано, что изменением режима работы ультразвукового генератора можно добиться оптимальной излучаемой акустической мощности магнитострикционного преобразователя. В работе обсуждаются оптимальные режимы работы магнитострикционных преобразователей, выполненных из разных материалов. Для этого проанализированы различные способы возбуждения магнитострикционных преобразователей и их недостатки, приводящие к исчезновению противонакипного эффекта, предложен свой способ возбуждения магнитострикционного преобразователя, основанный на подмагничивании магнитострикционного материала и повышающий противонакипной эффект. Показана важность повышения излучаемой акустической мощности ультразвуковых устройств для повышения противонакипного эффекта при минимально возможном потреблении энергии. Проведено сравнение с другими техническими решениями, используемыми изготовителями ультразвуковой противонакипной техники. Представлены экспериментальные результаты увеличения акустической мощности при предложенном способе возбуждения магнитострикционного преобразователя по сравнению с аналогичным показателем при других способах его возбуждения.

Введение. Известно, что в теплотехнике ультразвуковой метод борьбы с отложениями на теплопередающих поверхностях теплоагрегатов является одним из эффективных методов. Он заключается в обработке этих поверхностей механическими колебаниями ультразвуковой частоты, которые, воздействуя на воду и стенки теплоагрегата, препятствуют (оказывают сопротивление) образованию накипи и разрушают её. Однако некоторые производители ультразвуковых противонакипных устройств с целью продвижения своей продукции приводят заведомо противоречивую информацию касательно технических возможностей

своих ультразвуковых установок и получаемого противонакипного эффекта [5]. Разработчики и производители ультразвуковых противонакипных устройств в первую очередь должны стремиться к улучшению технических характеристик своего оборудования для эффективной борьбы с отложениями на теплоагрегатах при минимальном потреблении энергии.

К другим способам повышения эффективности противонакипного эффекта при совместном использовании ультразвуковых противонакипных устройств относится использование технологических приемов с целью формирования физических факторов предотвращения и разрушения таких отложений, как снижение звукоустойчивости накипи [4], изменение режимов работ теплоагрегатов, расчет конфигурации точек ввода ультразвуковых колебаний в теплоагрегат [3] и др.

К основным техническим характеристикам в ультразвуковых противонакипных устройствах относятся такие технические параметры, как излучаемая акустическая мощность, КПД устройства и интенсивность ультразвукового воздействия. На процесс разрушения отложений ультразвуком из этих трех параметров определяющими являются излучаемая акустическая мощность и интенсивность ультразвукового воздействия. Излучаемая акустическая мощность, в свою очередь, зависит от типа магнитострикционного преобразователя (МСП), материала МСП, режима работы ультразвукового генератора и способа возбуждения МСП.

Цель представленной работы – предложить способ определения излучаемой акустической мощности на теплоагрегате, способ её повышения при минимальном потреблении энергии и экспериментальное сравнение с аналогом при других способах возбуждения МСП.

Определение излучаемой акустической мощности на поверхности теплоагрегата. Акустическая мощность ультразвука является одной из основных характеристик, определяющих эффективность борьбы с отложениями. В литературе описаны разные методики её определения.

В источнике [4] удельная акустическая мощность определяется по формуле

$$P'_A = 0,063c^2 W \delta_m^2 Q_{\Pi} \cdot 10^{-7}, \quad (1)$$

где $Q_{\Pi} = Q/k$ – добротность многостержневого преобразователя; Q – добротность, определяемая по резонансной характеристике стержня, изготовленного из магнитострикционного материала; $k = 1 + d_{я}/(q_m h_o)$ – величина, постоянная для конкретного преобразователя; $d_{я}$ – высота яра (накладки) пакета преобразователя; q_m – отношение площади сечения стержня к площади излучающей поверхности; h_o – высота окна пакета преобразователя; W – удельное волновое сопротивление материала преобразователя; δ_m – амплитуда магнитострикции, c – скорость звука в материале преобразователя.

Однако для практического определения излучаемой акустической мощности на поверхности теплоагрегатов формула (1) неприменима. Во-первых, при использовании (1) необходимо знать площадь поверхности излучаемого торца преобразователя и площадь теплопередающей поверхности теплоагрегата. Во-вторых, в (1) указаны только конструктивные особенности МСП.

В-третьих, формула (1) не отражает режим работы ультразвукового генератора и, следовательно, возбуждаемого им МСП.

В целом формула (1) может быть применима только для определения расчетной теоретической предельной акустической мощности $P_{\text{Ат}}$, которую может излучать спроектированный МСП с заданными конструктивными и геометрическими параметрами [4]:

$$P_{\text{Ат}} = P'_A A_1 A_2, \quad (2)$$

где A_1 и A_2 – конструктивные постоянные, зависящие от геометрических размеров МСП.

Для расчета акустической мощности в [7] предлагается использовать формулу

$$P_A = \frac{1}{2} p c V^2 S, \quad (3)$$

где p – плотность материала преобразователя; S – площадь излучающей поверхности; $V = 2\pi f_p \delta_m$ – амплитуда колебательной скорости на излучающей поверхности; f_p – резонансная частота.

Формула (3) может быть применена только для практических расчетов акустических динамиков с площадью излучаемой поверхности S и неприменима для определения акустической мощности МСП. Наиболее корректно использование следующей формулы для оценки акустической мощности МСП [9]:

$$P_A = \frac{1}{2} p c \frac{(k a)^2}{2} V^2 S, \quad (4)$$

где $S = \pi a^2$ – площадь торца волновода МСП. Здесь предполагается выполнение условия

$$k a \ll 1,$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; $\lambda = cT$ – длина волны ультразвуковых колебаний; T – период ультразвуковых колебаний; a – радиус круглого волновода МСП.

Рассмотрим более подробно составляющие формулы (4). Такие параметры, как p , c , a и S , являются конструктивными константами, зависящими от применяемого магнестрикционного материала и геометрических размеров преобразователя. Для разных ультразвуковых генераторов, работающих на один и тот же преобразователь, эти параметры будут одинаковые. Параметры k и V зависят от режима работы ультразвукового генератора и способа возбуждения МСП. В непрерывном режиме работы излучаемая акустическая мощность определяется по формуле (4), в которой $T = 1/f_p$. В импульсном режиме работы усредненная за период T_n следования пачек импульсов управления акустическая мощность определяется по формуле

$$P_{\text{Асп}} = P_A \frac{n_n}{f_p T_n}, \quad (5)$$

где n_n – количество импульсов управления в пачке.

В ультразвуковых противонакипных установках все генераторы работают только в импульсном режиме с целью уменьшения потребления электроэнергии.

Импульсный режим работы задается ультразвуковым генератором путем изменения параметров n и T_n таким образом, что МСП может быть настроен на оптимальную излучаемую акустическую мощность. Оптимальной излучаемой акустической мощностью МСП является такая мощность, при которой практическая излучаемая акустическая мощность $P_{\text{Аср}}$ преобразователя совпадает с теоретической (расчетной) акустической мощностью $P_{\text{Ат}}$, на которую проектировался МСП: $P_{\text{Аср}} \approx P_{\text{Ат}}$. Если $P_{\text{Аср}} > P_{\text{Ат}}$, то преобразователь излучает повышенную акустическую мощность и будет находиться в перегруженном состоянии. Если $P_{\text{Аср}} < P_{\text{Ат}}$, то преобразователь излучает пониженную акустическую мощность и будет находиться в недогруженном состоянии.

Амплитуда колебательной скорости V на излучающей поверхности – самый важный параметр в ультразвуковых противонакипных установках. Резонансная частота f_p преобразователя ограничена применяемыми магнитоstrictionными материалами (ферромагнетики, ферриты). Амплитуда магнитоstrictionции δ_m преобразователя, которая влияет на увеличение излучаемой акустической мощности, зависит от способа возбуждения МСП. На практике δ_m определяют следующим образом:

$$\delta_m = K_A U_0 / f_p^2, \quad (6)$$

где K_A – постоянный коэффициент, рассчитанный для чувствительности акселерометра; U_0 – напряжение на стенке теплоагрегата, снимаемое с акселерометра на нагрузке 1 МОм (входное сопротивление осциллографа).

Определение акустической мощности по КПД МСП в зависимости от потребляемой ультразвуковым генератором электрической мощности некорректно потому, что при этом не учитываются потери энергии генератора на преобразование электрического тока в механические колебания МСП. Кроме того, КПД МСП меняется и от способа возбуждения МСП.

Способы возбуждения магнитоstrictionционных преобразователей. На сегодняшний день промышленностью серийно выпускаются импульсные ультразвуковые генераторы для противонакипных ультразвуковых систем со следующими способами возбуждения МСП:

- 1) одноимпульсный ударный при воздействии однополярным переменным током (рис. 1);
- 2) многоимпульсный на половинной резонансной частоте при воздействии однополярным переменным током (рис. 2);
- 3) многоимпульсный на половинной резонансной частоте при воздействии симметричным переменным током (рис. 3).

Необходимо отметить, что МСП изготавливают из ферромагнетиков (пермендюр К49Ф2, никель Н0, альфер Ю-14) и ферритов (Ф-38, Ф-42). Из ферромагнетиков наиболее предпочтителен преобразователь из пермендюра К49Ф2, а из ферритов – Ф-42.

Для определения максимальной амплитуды магнитоstrictionции δ_m изобразим графики зависимости относительного изменения линейного размера $\Delta l/l$ магнитоstrictionционного материала из Ф-42 и К49Ф2 от магнитной индукции B

и времени t . При воздействии одинаковым возбуждающим импульсом ВИ с амплитудой магнитной индукции $B_{mВИ}$ на МСП из материалов Ф-42 и К49Ф2 МСП, выполненный из феррита Ф-42, входит в насыщение (рис. 1), амплитуда переменной деформации $X_{ВИ}$ ограничивается сверху. Следовательно, МСП из Ф-42 необходимо запитывать меньшим напряжением (рис. 1). Указанный способ возбуждения МП имеет малое потребление энергии, однако и излучаемая акустическая мощность также имеет небольшое значение. Амплитуда магнитострикции δ_m торца преобразователя из материала Ф-42, погруженного в воду (без приварки на теплообменную поверхность), составляет $2,5 \div 4,0$ мкм [5]. Данный способ возбуждения МСП реализован в ультразвуковых противонакипных установках [5, 6]. Феррит Ф-42 имеет хорошую добротность, его достаточно возбудить одним импульсом $n_{и} = 1$, после чего МСП из этого материала будет колебаться на собственной резонансной частоте с постепенным снижением амплитуды X_1 . Для увеличения амплитуды переменной деформации X_1 вместо феррита Ф-42 необходимо применять ферромагнетики, поскольку ферриты имеют малую индукцию насыщения B_S .

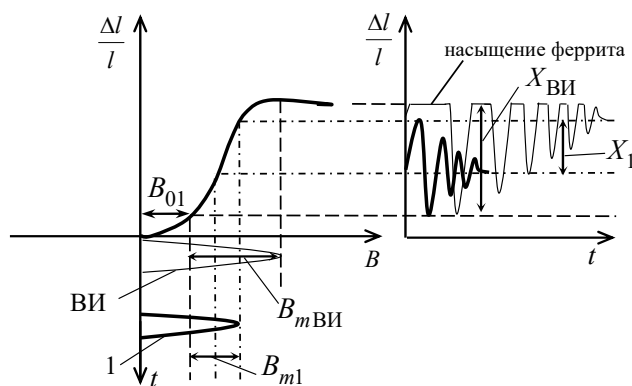


Рис. 1. Изменение деформации преобразователя из феррита во времени при одноимпульсном ударном возбуждении путем воздействия однополярным переменным током (магнитострикционный материал – феррит Ф-42 с магнитной индукцией насыщения $B_S = 0,54$ Тл; число импульсов в пачке $n_{и} = 1$)

Второй способ возбуждения МСП основан на многоимпульсном воздействии однополярным переменным током на материал преобразователя, выполненный из пермендюра К49Ф2 (рис. 2). При таком способе возбуждения импульсами 2 с магнитной индукцией, равной B_{m2} , материал ферромагнетика К49Ф2 уже не входит в насыщение, и амплитуда переменной деформации X_2 торца преобразователя увеличивается примерно в два раза по сравнению с аналогом при первом способе возбуждения: $X_2 = 2X_1$. При количестве импульсов управления в пачке $n_{и} = 24$ увеличивается время воздействия на излучаемый объект в 24 раза. Таким образом, излучаемая акустическая мощность по амплитудной составляющей увеличивается в два раза, а по временной составляющей – в 24 раза. Однако при таком способе происходит большее потребление энергии из сети: для того, чтобы добиться большой деформации X_2 , необходимо увеличивать напряжение питания МСП по сравнению с первым способом

(рис. 1). Данный способ реализован в тиристорных ультразвуковых противонакипных устройствах [3, 7], в которых из-за низкого КПД тиристоров количество импульсов управления в пачке ограничено 24. При большем количестве импульсов управления увеличиваются габариты ультразвукового генератора, понижается его КПД, возникает задача охлаждения МСП. Однако такая проблема отсутствует в транзисторных ультразвуковых генераторах. Практические измерения при таком способе возбуждения показали значения $\delta_m = 7 \div 12$ мкм [1].

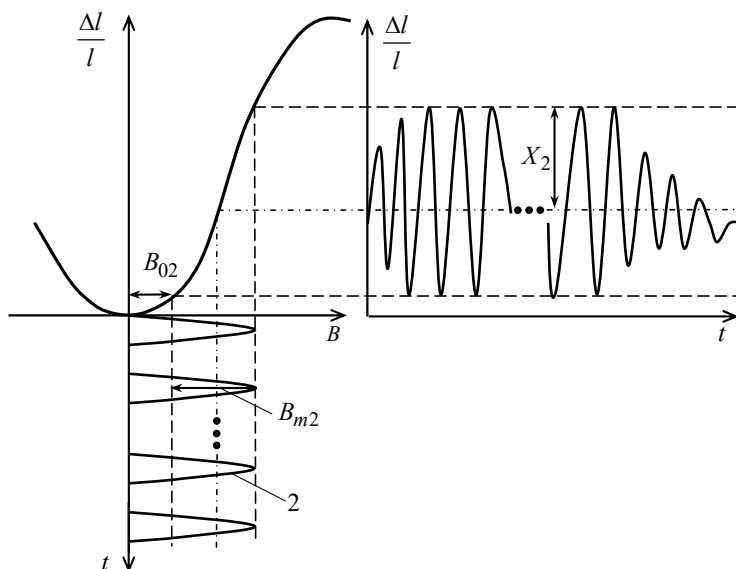


Рис. 2. Изменение деформации преобразователя из ферромагнетика во времени при многоимпульсном возбуждении на половинной резонансной частоте при воздействии однополярным переменным током (магнитострикционный материал – пермендюр К49Ф2 с магнитной индукцией насыщения $B_S = 2,4$ Тл; число импульсов в пачке $n_n = 24$)

При многоимпульсном возбуждении на половинной резонансной частоте $f_p = 2f$ и воздействии симметричным переменным током (рис. 3) акустическая мощность временной составляющей может быть увеличена в 8 раз. Однако амплитудная составляющая X_3 будет примерно в 10–15 раз меньше, чем при втором способе возбуждения; на практике амплитуда магнитострикции составляет $\delta_m = 0,8 \div 1,5$ мкм [4]. Для увеличения X_3 до значения амплитуды X_2 необходимо увеличивать напряжение питания МСП до уровня, при котором амплитуда магнитной индукции импульсов возбуждения составит $B_{m3} = B_{02} + B_{m2}$. Но это, в свою очередь, повлечет за собой большее потребление энергии из сети.

Авторами работы предложен четвертый способ возбуждения МСП, который основан на увеличении индукции смещением рабочей точки B_{04} без увеличения напряжения питания преобразователя так, что $B_{m3} = B_{m4}$ (рис. 3). Для этого необходимо возбуждать МСП многоимпульсным способом на собственной резонансной частоте $f_p = f$ при воздействии симметричным переменным

током с подмагничиванием магнестрикционного материала [10]. Если принять $B_{04}/B_{m4} = 5$, то амплитуда переменной деформации увеличивается в 20 раз: $X_4 = 20X_3$ [4]. Практические измерения такого способа возбуждения показали значения $\delta_m = 20 \div 35$ мкм [8]. Из всех представленных способов возбуждения МСП последний способ имеет максимальную излучаемую акустическую мощность как по амплитудной, так и временной составляющей.

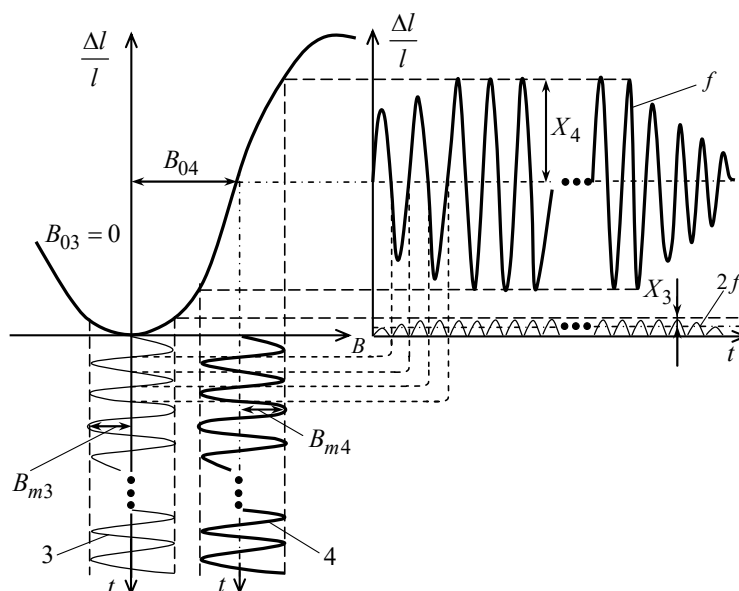


Рис. 3. Изменение деформации преобразователя из ферромагнетика во времени при многоимпульсном возбуждении на половинной резонансной частоте при воздействии симметричным переменным током (3); многоимпульсном возбуждении на собственной резонансной частоте при воздействии симметричным переменным током с подмагничиванием (4) (магнестрикционный материал – пермендюр К49Ф2 с магнитной индукцией насыщения $B_s = 2,4$ Тл; число импульсов в пакете $n_n = 200$)

Ниже представлены результаты расчета излучаемой акустической мощности, определяемой теоретическим (2) и практическим (5) способами для МСП, работающего на резонансной частоте 22 кГц с неизменными геометрическими размерами с учетом режима работы. Параметры формул (2) и (5) для удобства сведены в табл. 1–3.

Таблица 1

**Конструктивные константы МСП,
выполненного из разного материала**

Материал	c , м/с	ρ , кг·м ³	W , г/с·м ²	k	Q	Q_n	δ_m max, мкм	Тип деформации
Ф-42	5940	5270	31 303 800	1,23	360	292,7	-26...0	сжатие
К49Ф2	5200	8100	42 120 000	1,23	140	113,8	0...+70	растяжение

Таблица 2

Режимы работы МСП, выполненного из материала Ф-42

Импульсный режим работы, $k = 2\pi/(cT)$	Способ возбуждения, при котором δ_m	a , м	S , м ²
1a: $P_{\text{Аср}} > P_{\text{Ат}}$ $n_{\text{и}} = 1, T_{\text{п}} = 0,001$ с	2,5...4	0,0175	0,00096
1b: $P_{\text{Аср}} \approx P_{\text{Ат}}$ $n_{\text{и}} = 1, T_{\text{п}} = 0,0021$ с			
1c: $P_{\text{Аср}} < P_{\text{Ат}}$ $n_{\text{и}} = 1, T_{\text{п}} = 0,01$ с			

Таблица 3

Режимы работы МСП, выполненного из материала К49Ф2

Импульсный режим работы, $k = 2\pi/(cT)$	Способ возбуждения, при котором δ_m	a , м	S , м ²
2a: $P_{\text{Аср}} > P_{\text{Ат}}$ $n_{\text{и}} = 24, T_{\text{п}} = 0,08$ с	7...12	0,0175	0,00096
2b: $P_{\text{Аср}} \approx P_{\text{Ат}}$ $n_{\text{и}} = 24, T_{\text{п}} = 0,22$ с			
2c: $P_{\text{Аср}} < P_{\text{Ат}}$ $n_{\text{и}} = 24, T_{\text{п}} = 0,4$ с			
3a: $P_{\text{Аср}} > P_{\text{Ат}}$ $n_{\text{и}} = 200, T_{\text{п}} = 0,1$ с	0,8...1,5	0,0175	0,00096
3b: $P_{\text{Аср}} \approx P_{\text{Ат}}$ $n_{\text{и}} = 200, T_{\text{п}} = 1,31$ с			
3c: $P_{\text{Аср}} < P_{\text{Ат}}$ $n_{\text{и}} = 200, T_{\text{п}} = 4,9$ с			
4a: $P_{\text{Аср}} > P_{\text{Ат}}$ $n_{\text{и}} = 200, T_{\text{п}} = 0,75$ с	20...35	0,0175	0,00096
4b: $P_{\text{Аср}} \approx P_{\text{Ат}}$ $n_{\text{и}} = 200, T_{\text{п}} = 1,55$ с			
4c: $P_{\text{Аср}} < P_{\text{Ат}}$ $n_{\text{и}} = 200, T_{\text{п}} = 2,7$ с			

В табл. 1 параметр $\delta_{m \text{ max}}$ – максимально возможная амплитуда магнито-стрикции данного материала (на практике «раскачать» материал до такого значения затруднительно). Для удобства расчета в формулах (2) и (5) применены положительные значения δ_m для материала Ф-42, так как сжатие или растяжение доменной структуры материала преобразователя не имеет значения для возбуждения ультразвуковых колебаний. При работе с уже заданным количеством импульсов управления $n_{\text{и}}$ необходимо подстраивать частоту следования пачек $f_{\text{п}}$ таким образом, чтобы не перегреть МСП. При малом $n_{\text{и}}$ необходимо увеличивать $f_{\text{п}}$, при большом $n_{\text{и}}$ – уменьшать $f_{\text{п}}$.

На рис. 4 и 5 представлены зависимости излучаемой акустической мощности от амплитуды магнитострикции для второго и четвертого способов возбуждения магнитостриктора при $A_1 = 624,03$ и $A_2 = 0,437$.

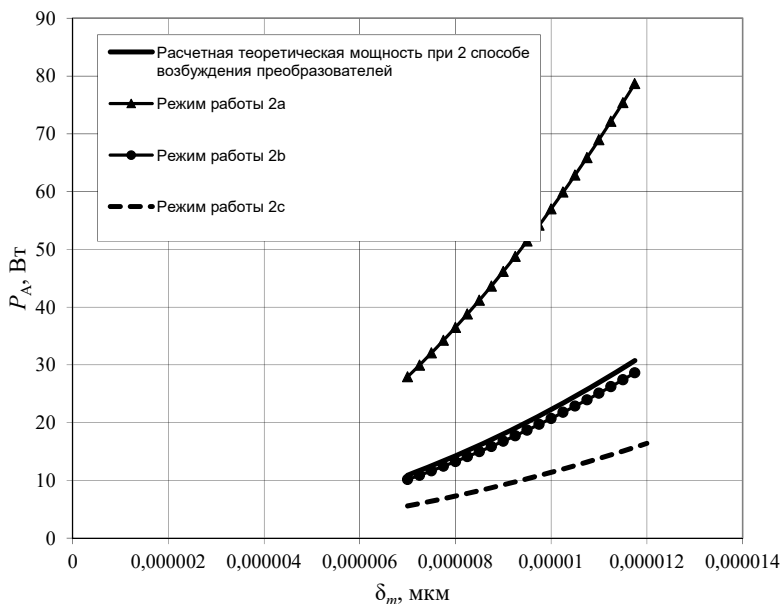


Рис. 4. Теоретическая $P_{АТ}$ и практическая $P_{Аср}$ излучаемая акустическая мощность при втором способе возбуждения магнитострикционного преобразователя

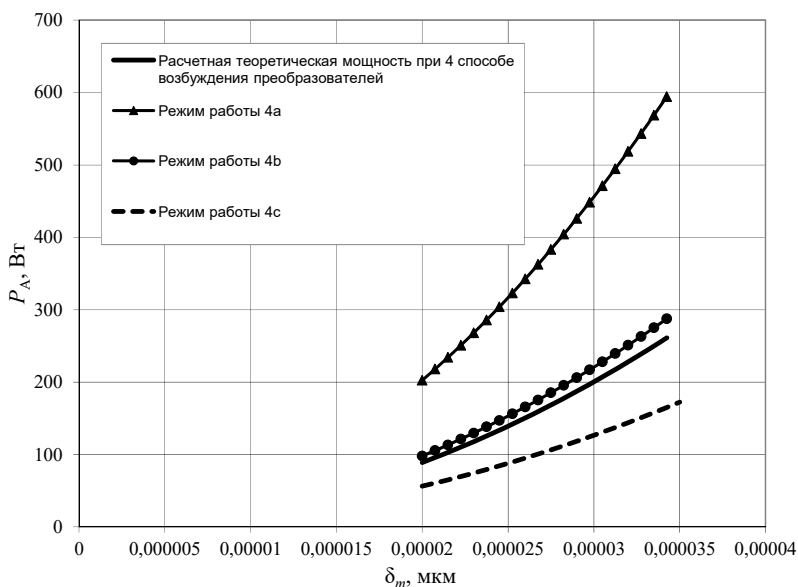


Рис. 5. Теоретическая $P_{АТ}$ и практическая $P_{Аср}$ излучаемая акустическая мощность при четвертом способе возбуждения магнитострикционного преобразователя

Анализ этих зависимостей и данных табл. 3 показывает, что путем изменения импульсного режима работы ультразвукового генератора можно добиться оптимальной излучаемой акустической мощности.

Экспериментальные результаты. Для подтверждения теоретических результатов была определена амплитуда магнитострикции δ_m торца преобразователя на холостом ходу при втором (рис. 2) и четвертом (рис. 3, кривая 4) способах возбуждения МСП. Для этого эксперимента был выбран один и тот же МСП, работающий на резонансной частоте 20,3 кГц. Фиксация колебаний торца преобразователя производилась без нагрузки с помощью высокочастотного пьезоэлектрического акселерометра.

Осциллографом фиксировалось максимальное значение амплитуды колебаний торца преобразователя, амплитуда магнитострикции δ_m МСП определялась по формуле (6), в которой принято $K_A = 150$, $f_p = 20,3$ кГц, посредством фиксации напряжения U_0 акселерометром. Осциллограммы изменения линейного размера торца МСП при втором и четвертом способах представлены на рис. 6 и 7, соответственно.

На этих рисунках выделены площади ультразвукового воздействия, определяемые амплитудой U_0 и длительностью воздействия на МСП. При втором способе возбуждения $U_0 \approx 46,88$ мВ, при четвертом способе – $U_0 \approx 90$ мВ. Из формулы (6) определяем

$$\delta_m = 153 \cdot \frac{46,88}{20,3^2} = 17,4 \text{ мкм при втором способе возбуждения;}$$

$$\delta_m = 153 \cdot \frac{90}{20,3^2} = 33,4 \text{ мкм при четвертом способе возбуждения.}$$

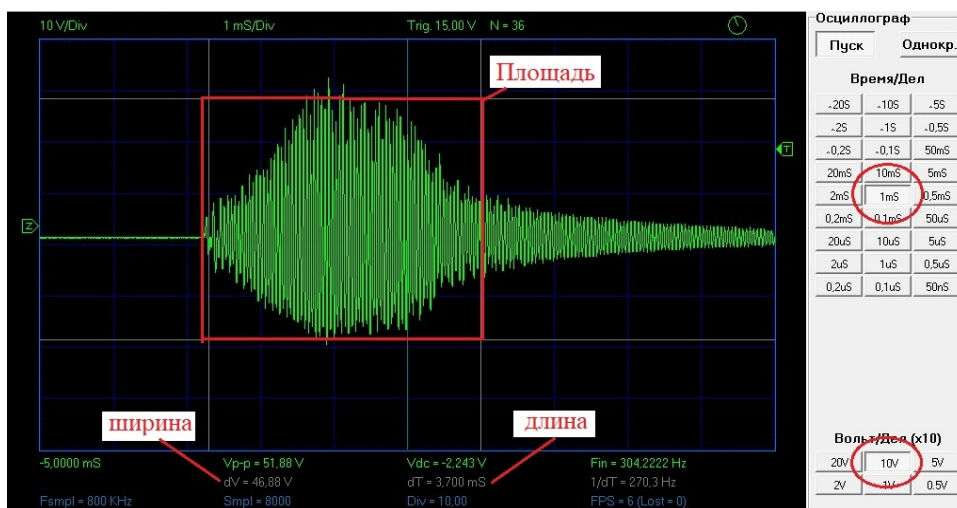


Рис. 6. Экспериментальный результат изменения деформации преобразователя из ферромагнетика во времени при многоимпульсном возбуждении на половинной резонансной частоте при воздействии однополярным переменным током (магнитострикционный материал – пермендюр К49Ф2 с магнитной индукцией насыщения $B_s = 2,4$ Тл; число импульсов в пакете $n_n = 24$)

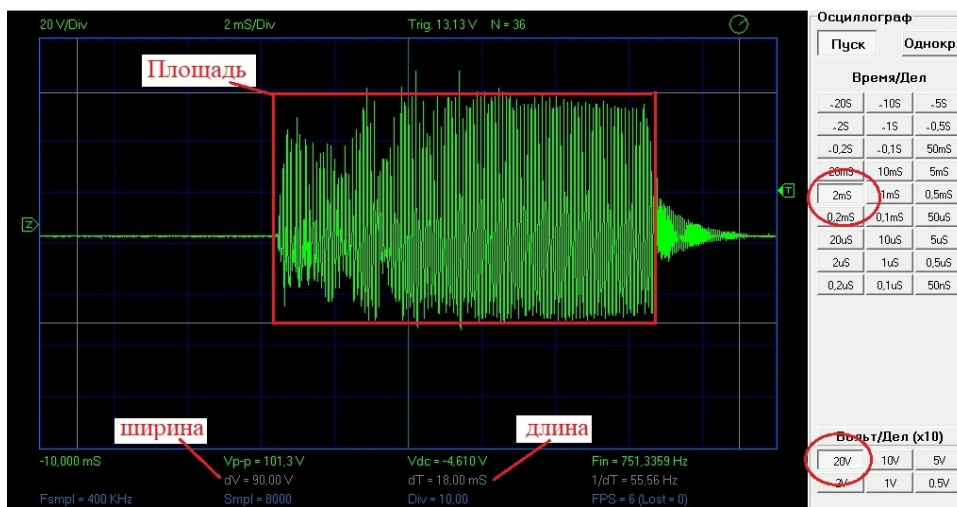


Рис. 7. Экспериментальные результаты изменения деформации МПС из ферромагнетика во времени при многоимпульсном возбуждении на собственной резонансной частоте при воздействии симметричным переменным током с подмагничиванием (магнитострикционный материал – пермендюр К49Ф2 с магнитной индукцией насыщения $B_S = 2,4$ Тл; число импульсов в пакке $n_n = 200$)

После определения амплитуды магнитострикции δ_m подстановкой ее в (4) определяется практическая излучаемая акустическая мощность P_A . Экспериментальные данные показали, что при четвертом способе возбуждения МСП практическая излучаемая акустическая мощность имеет наибольшее значение, что подтверждает теоретическое предположение (рис. 3, кривая 4).

Выводы. 1. Вследствие малой излучаемой акустической мощности P_A на теплоагрегатах противонакипной эффект может отсутствовать вовсе.

2. По формуле (2) можно определять теоретическую (расчетную) акустическую мощность проектируемого магнитострикционного преобразователя. На практике с учетом импульсного режима работы ультразвукового генератора необходимо пользоваться формулой (4) для определения реальной излучаемой акустической мощности МСП при непрерывном возбуждении и (5) при импульсном возбуждении.

3. Для увеличения амплитудной составляющей излучаемой акустической мощности преобразователя предложен многоимпульсный способ возбуждения на собственной резонансной частоте при воздействии симметричным переменным током с подмагничиванием, что подтверждает эксперимент.

4. Регулируя импульсный режим работы ультразвукового генератора, можно вводить магнитострикционный преобразователь в режим оптимальной излучаемой акустической мощности при любом способе возбуждения преобразователя. Если предусмотреть систему охлаждения преобразователя, то можно реализовать режим, когда $P_{Acpr} > P_{At}$, и получать повышенную излучаемую акустическую мощность.

5. Ввиду малой индукции насыщения ферриты неприменимы для создания мощных магнитоотрицательных преобразователей, хотя добротность и КПД таких преобразователей выше, чем у МСП на ферромагнетиках [2]. Для значительного противонакипного эффекта главным параметром остается индукция насыщения B_S материала преобразователя.

6. Увеличение излучаемой акустической мощности на теплоагрегате при минимальном потреблении энергии является решаемой задачей, а представленный способ повышения противонакипного эффекта дешевле и экономически более выгоден, чем такие способы, как изменение режима работы теплоагрегата и изменение режима водоподготовки.

Литература

1. *Абрамов О.В., Абрамов В.О., Муллакаев М.С., Артемьев В.В.* Анализ эффективности передачи ультразвуковых колебаний в нагрузку // Акустический журнал. 2009. Т. 55, № 6. С. 828–844.
2. *Валуев В.Н., Ганева Л.И., Голямина И.П.* Сравнение свойств преобразователей из различных магнитоотрицательных материалов // Акустический журнал. 1970. Т. 16, № 1. С. 32–36.
3. *Волк Г.М., Гагутин В.З., Мелихова В.П., Фролов В.П., Щербаков С.Н.* Исследование эффективности ультразвукового метода снижения скорости образования накипи в паяных пластинчатых теплообменниках // Энергосбережение. 2003. № 2. С. 16–17.
4. *Донской А.В., Келлер О.К., Кратыш Г.С.* Ультразвуковые электротехнологические установки. М.: Энергоиздат, 1982. 204 с.
5. *Зверев В.С.* Эффективность применения ультразвукового противонакипного аппарата УПА-2М в теплоэнергетике // Энергосбережение и водоподготовка. 2007. № 2(46). С. 39.
6. *Зверев В.С., Ахмеджанов Р.А.* Повышение эффективности ультразвукового метода защиты теплопередающих поверхностей от накипи // Энергосбережение и водоподготовка. 2009. № 1(57). С. 39–42.
7. *Панфиль П.А., Андреев А.Г., Митюржев А.Н.* Повышение мощности акустических противонакипных устройств // Новости теплоснабжения. 2017. № 06 (202) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rosteplo.ru/nt/202> (дата обращения: 26.07.2022).
8. Пат. 2548965 РФ, МПК F28G 7/100. Устройство для ультразвуковой очистки теплообменных агрегатов от отложений и интенсификации технологических процессов / С.В. Янкевич, В.А. Афанасьев, А.А. Кузин; заявитель и патентообладатель ООО "ДЖЕНЕРУС"; заявл. № 2014105207/05 от 13.02.2014; опубл. 20.04.2015. Бюл. № 11.
9. Физическая энциклопедия Т.2. Добротность- магнитооптика / гл. ред. А.М. Прохоров; ред. коллегия: Д.М. Алексеев, А.М. Балдин, А.М. Бонч-Бруевич, А.С. Боровик-Романов, А.М. Прохоров. М.: Сов. энцикл., 1990. 704 с.
10. *Янкевич С.В., Малинин Г.В.* Обзор схемотехнических решений при построении силовой части ультразвуковых генераторов // Вестник Чувашского университета. 2020. № 1. С. 212–220.

ЯНКЕВИЧ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ – аспирант кафедры промышленной электроники, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (ds3617@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6151-0448>).

МАЛИНИН ГРИГОРИЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ – кандидат технических наук, заведующий кафедрой промышленной электроники, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (malgrig6@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3993-0435>).

АБРУКОВ ВИКТОР СЕРГЕЕВИЧ – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой прикладной физики и нанотехнологий, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (abrukov@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4680-6224>).

Sergey V. YANKEVICH, Grigoriy V. MALININ, Viktor S. ABRUKOV
METHOD FOR INCREASING RADIATED ACOUSTIC POWER
ON THERMAL POWER EQUIPMENT TO INCREASE THE EFFECT
OF PREVENTING DEPOSITS

Key words: ultrasonic generator, thermal power equipment, effect of preventing deposits, radiated acoustic power, magnetostrictive transducer, amplitude of magnetostriction, saturation induction, bias.

The paper proposes a method for increasing the radiated acoustic power of ultrasonic (acoustic) devices of preventing deposits, ensuring their effectiveness. A formula for determining the specific acoustic power of a magnetostrictive transducer, depending on its physical characteristics, is known from literary sources. However, in practice, this formula can only be applied to determine the calculated theoretical maximum acoustic power that a designed magnetostrictive transducer with specified design and geometric parameters can emit. The paper presents a formula for determining the practical radiated acoustic power of a magnetostrictive converter on thermal power equipment, taking into account the operating mode of the ultrasonic generator and the method of excitation of the magnetostrictive converter. Using the above formulas, the radiated acoustic power is estimated in the pulsed mode of operation of the ultrasonic generator in comparison with the theoretically possible radiated power. It is shown that by changing the operating mode of the ultrasonic generator, it is possible to achieve optimal radiated acoustic power of the magnetostrictive transducer. The paper discusses the optimal operating modes of magnetostrictive transducers made of different materials. For this purpose, various methods of excitation of magnetostrictive transducers and their disadvantages leading to the disappearance of the effect of preventing deposits are analyzed, a method of excitation of the magnetostrictive transducer based on the bias of the magnetostrictive material and increasing the effect of preventing deposits is proposed. The importance of increasing the radiated acoustic power of ultrasonic devices to increase the effect of preventing deposits with the lowest possible energy consumption is shown. A comparison is made with other technical solutions used by manufacturers of ultrasonic preventing deposits equipment. Experimental results of an increase in acoustic power with the proposed method of excitation of a magnetostrictive transducer in comparison with other methods of its excitation are presented.

References

1. Abramov O.V., Abramov V.O., Mullakaev M.S., Artem'ev V.V. *Analiz effektivnosti peredachi ul'trazvukovykh kolebaniy v nagruzku* [Analysis of the efficiency of ultrasonic vibration transfer to the load]. *Akusticheskii zhurnal*, 2009, vol. 55, no. 6, pp. 828–844.
2. Valuev V.N., Ganeva L.I., Golyamina I.P. *Sravnenie svoystv preobrazovatelei iz razlichnykh magnitostriksionnykh materialov* [Comparison of the properties of transducers made of various magnetostrictive materials]. *Akusticheskii zhurnal*, 1970, vol. 16, no. 1, pp. 32–36.
3. Volk G.M., Galutin V.Z., Melikhova V.P., Frolov V.P., Shcherbakov S.N. *Issledovanie effektivnosti ul'trazvukovogo metoda snizheniya skorosti obrazovaniya nakipi v payanykh plastinchatykh teploobmennikakh* [Investigation of the effectiveness of the ultrasonic method of reducing the rate of scale formation in brazed plate heat exchangers]. *Energoberezhenie* [Energy saving], 2003, no. 2, pp. 16–17.
4. Donskoi A.V., Keller O.K., Kratysh G.S. *Ul'trazvukovye elektrotekhnologicheskie ustanovki* [Ultrasonic electrotechnological devices]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982, 204 p.
5. Zverev V.S. *Effektivnost' primeneniya ul'trazvukovogo protivonakipnogo apparata UPA-2M v teploenergetike* [The effectiveness of the use of the ultrasonic anti-boiling device UPA-2M in the heat power industry]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*, 2007, no. 2(46), p. 39.
6. Zverev V.S., Akhmedzhanov R.A. *Povyshenie effektivnosti ul'trazvukovogo metoda zashchity teploperedayushchikh poverkhnostei ot nakipi* [Improving the efficiency of the ultrasonic method of protecting heat transfer surfaces from deposits]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*, 2009, no. 1(57), pp. 39–42.

7. Panfil' P.A., Andreev A.G., Mityuryaev A.N. *Povyshenie moshchnosti akusticheskikh protivonakipnykh ustroystv* [Increasing the power of acoustic devices against deposits]. *Novosti teplosnabzheniya*, 2017, no. 06 (202). Available at: <http://www.rosteplo.ru/nt/202>.

8. Yankevich S.V., Afanas'ev V.A., Kuzin A.A. *Ustroistvo dlya ul'trazvukovoi ochistki teploobmennyykh agregatov ot otlozhenii i intensivifikatsii tekhnologicheskikh protsessov* [Device for ultrasonic cleaning of heat exchange units from deposits and intensification of technological processes]. Patent RF no. 2014105207/05, 2015.

9. Alekseev D.M., Alekseev D.M., Baldin A.M., Bonch-Bruevich A.M., Borovik-Romanov A.S., Prokhorov A.M. *Fizicheskaya entsiklopediya T.2. Dobrotnost'- magnitooptika* [Physical Encyclopedia vol. 2. Q-factor – magneto-optics]. Moscow: Sov. entsikl., 1990, 704 p.

10. Yankevich S.V., Malinin G.V. *Obzor skhemoskhnicheskikh resheniy pri postroenii silovoy chasti ul'trazvukovykh generatorov* [Schematic solutions overview for construction of ultrasonic generators power unit]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2020, no. 1, pp. 212–220.

SERGEY V. YANKEVICH – Post-Graduate Student of Industrial Electronics Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (ds3617@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6151-0448>).

GRIGORIY V. MALININ – Candidate of Technical Sciences, Head of the Industrial Electronics Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (malgrig6@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3993-0435>).

VIKTOR S. ABRUKOV – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Applied Physics and Nanotechnology, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (abrukov@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4680-6224>).

Формат цитирования: Янкевич С.В., Малинин Г.В., Аbrukов В.С. Способ повышения излучаемой акустической мощности на теплоагрегатах для увеличения противонакипного эффекта // Вестник Чувацкого университета. – 2022. – № 3. – С. 114–127. DOI: 10.47026/1810-1909-2022-3-114-127.