

УДК 621-1/-9

DOI:10.30987/2223-4608-2021-10-11-17

**Р.И. Нигметзянов**, к.т.н., **Н.В. Лёвушкина**, техник,  
**В.А. Перекрестова**, старший преподаватель, **А.В. Сухов**, аспирант  
(Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),  
125319, Москва, Ленинградский проспект, 64)  
E-mail: lefmo@yandex.ru

## **Расчет основных показателей ультразвуковой колебательной системы для интенсификации процессов газового азотирования\***

*Рассмотрены вопросы конструирования ультразвуковой колебательной системы с учётом особенностей воздействия на газовую среду. Приведены расчёты элементов ультразвуковой колебательной системы. Проанализированы виды мембранных излучателей для воздействия на насыщающую среду при газовом азотировании.*

**Ключевые слова:** ультразвуковые технологии; азотирование; ультразвуковая колебательная система; магнитоstrictionный преобразователь; мембранный излучатель.

**R.I. Nigmatzyanov**, Candidate of Technical Sciences, **N.V. Levushkina**, technician,  
**V.A. Perekrestova**, senior lecturer, **A.V. Sukhov**, post-graduate student  
(Moscow of Motor Road State Technical University (MADI), 64, Leningradsky Avenue, Moscow, 125319)

## **Calculation of the main parameters of the ultrasonic oscillatory system for the intensification of gas nitriding processes**

*The paper studies the matters of designing an ultrasonic oscillatory system taking into account the peculiarities of the impact on the gas environment. Calculations of the elements of an ultrasonic oscillatory system are presented. The types of membrane emitters for influencing the saturating medium during gas nitriding are analyzed.*

**Keywords:** hypersonic technologies; nitriding; ultrasonic oscillatory system; magnetostriction transducer; membranous emitter.

Ресурс работы деталей и узлов изделий машиностроения является важнейшей характеристикой для их эксплуатации, который зависит от таких показателей как износостойкость и выносливость при различных механических воздействиях. Для улучшения данных свойств в современных отраслях промышленности, машиностроения, в частности, широко применяются методы поверхностного упрочнения, приводящие к изменению физико-механических свойств обрабатываемого изделия.

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00660, <https://rscf.ru/project/21-19-00660>.

Среди методов поверхностного упрочнения зарекомендовало себя газовое азотирование, благодаря вариативному созданию многофазного диффузионного слоя. Процесс азотирования происходит таким образом, что вначале наблюдается быстрый рост азотированного слоя, а с увеличением его толщины эта скорость снижается. Объяснение представленной закономерности кроется в быстром росте нитридного слоя, образующегося на поверхности с увеличением времени проведения процесса. Получаемая на поверхности  $\epsilon$ -фаза оказывает эффект снижения диффузионного процесса азота от поверхности в  $\alpha$ -фазу, в результате чего длительность азотирования значительно

возрастает, этим и характеризуется главный недостаток данного метода.

Сокращение длительности процесса газового азотирования выполнимо с привлечением для интенсификации процесса ультразвуковых технологий. Исследования воздействия ультразвука на диффузионные процессы уже давно подтвердили свою эффективность [1]. Особенностью, которую необходимо учитывать при проектировании ультразвукового оборудования для воздействия на газовые среды, является требование к высокой интенсивности генерируемых механических колебаний ультразвуковой частоты.

Используемое ультразвуковое оборудование для интенсификации в газовых средах состоит из ультразвуковой колебательной системы (УКС) и её питания. В УКС входят: ультразвуковой преобразователь энергии электрических колебаний, поступающих от ультразвукового генератора; усиливающий колебания волновод и излучатель, осуществляющий введение ультразвуковых колебаний в подвергаемую ультразвуковому воздействию среду. Питание УКС обеспечивает генератор, осуществляющий преобразование электрической энергии в ультразвуковые колебания [2].

В связи с необходимостью создания высокоамплитудных колебаний для конструирования ультразвуковой колебательной системы целесообразно применять магнитострикционные преобразователи, состоящие из сердечника и обмотки. Сердечник преобразователя выполняется из магнитострикционных материалов. Необходимость учета различных энергетических требований, анализ электро- и магнитоакустических характеристик доступных материалов обусловили выбор сплава пермендюра системы Fe-Co K49Ф2, как материал сердечника.

Первостепенным этапом конструирования ультразвуковой колебательной системы является определение ряда геометрических параметров сердечника. Такими параметрами выступают: ширина пластины  $b$ ; ширина стержней  $a$ ; толщина накладок  $d$ ; толщина набора пакета  $t$ ; ширина окна  $c$ ; высота окна  $h$ . Расчетная схема размеров преобразователя представлена на рис. 1.

Для определения площади излучения магнитострикционного преобразователя учитывается удельная акустическая мощность, заданная выбором материала сердечника. Геометрические параметры сердечника неразрывно связаны с резонансной частотой  $f_r$  УКС. Рас-

чет резонансной частоты УКС  $f_r$  проводится с использованием безразмерного параметра  $q$  из условия резонанса:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\pi d}{\lambda}\right) \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi h}{\lambda}\right) - q = 0,$$

где  $q = \frac{S_r}{S} = \frac{2a}{(2a+c)} = \frac{2 \cdot 14}{(2 \cdot 14 + 12)} = 0,7$ ;  $S_r$  – площадь поперечного сечения стержней сердечника;  $\lambda = \frac{c_l}{f_r}$  – длина волны упругих колебаний в материале сердечника на резонансной частоте.

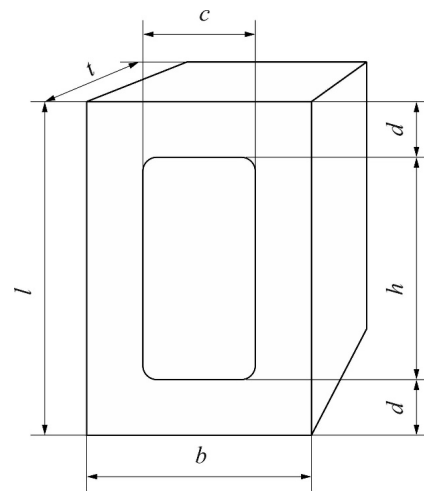


Рис. 1. Расчетная схема геометрических параметров магнитострикционного преобразователя

Одним из условий получения максимальной акустической мощности преобразователя является оптимальное соотношение площади стержней к площади излучения  $S$  и толщины накладок  $d$  к толщине стержней  $a$ .

По известным данным [3] значение  $q$  должно превышать величину 0,65 и при этом должно соблюдаться условие свободного расположения на стержнях обмотки возбуждения, т.е. ширины окна:

$$c = 3d_w,$$

где  $d_w$  – толщина провода обмотки с учетом изоляции.

Используя провод с диаметром жилы 1,5 мм и  $d_w \sim 4$  мм можно оценить ширину окна  $c = 12$  мм. Тогда ширина стержней  $a$ :

$$a = \frac{b-c}{2} = \frac{40-12}{2} = 14 \text{ мм.}$$

Толщина накладок  $d$  должна находиться в пределах 0,85...1,1 от ширины стержня  $a$ , при

этом должно соблюдаться условие:

$$d \cdot B_s > a \cdot B_{\max},$$

где  $B_{\max}$  – максимальная индукция;  $B_s$  – индукция насыщения.

Примем  $d \sim 1,07a = 15$  мм. По известным значениям  $f_r$ ,  $q$  и  $d$  из условия резонанса можно найти высоту окна  $h = 80$  мм, следовательно, общую высоту сердечника пакета УКС  $L$ :

$$L = h + 2d = 80 + 2 \cdot 15 = 110 \text{ мм.}$$

Таким образом, для сердечника преобразователя типа MST-2/22 были получены следующие значения геометрических параметров: ширина пластины  $b = 40$  мм; ширина стержней  $a = 14$  мм; ширина окна  $c = 12$  мм; толщина накладок  $d = 15$  мм; толщина набора пакета  $t = 37,5$  мм; высота окна  $h = 80$  мм; общая высота  $L = 110$  мм.

Приведем расчет охлаждения УКС.

При конструировании магнестрикционного преобразователя необходимо иметь в виду, что мощность потерь  $PL = P_v (1 - \eta_{за})$  превращается в тепло, нагревающее преобразователь. Температура, при которой магнестрикционные свойства преобразователя начинают резко снижаться, намного ниже температуры Кюри.

Помимо влияния на величину магнестрикции и стабильность работы преобразователя, температура влияет и на целостность изолирующего покрытия пластин, а также на электрическую и механическую прочность изоляции обмотки. Температура, которая допускается на поверхности сердечника, не должна превышать в своём значении  $100^\circ\text{C}$ , однако внутри сердечника её показатель может быть увеличен до  $200^\circ\text{C}$ .

С целью обеспечения эффективного функционирования магнестрикционного преобразователя необходимо организовать охлаждение системы. Разработка системы охлаждения должна базироваться на таких параметрах как температура охладителя (чаще всего охладителем выступает вода); скорость движения охладителя в системе  $v_w$  и размеров поверхности сердечника для охлаждения  $S_c$ .

Величина поверхности охлаждения сердечника находится следующим образом:

$$\begin{aligned} S_c &= 2b(t + l) + 2t(l + h) = \\ &= 2 \cdot 40(37,5 + 110) + 2 \cdot 30(110 + 80) = \\ &= 26043,8 \text{ мм}^2 \sim 261 \text{ см}^2. \end{aligned}$$

Допустимую мощность потерь  $PL$  (мощность, которую «способна» отвести от преобразователя принятая система охлаждения) можно определить как:

$$PL = S_c \alpha (T_m - T_w),$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплопередачи;  $T$  – температура на поверхности преобразователя;  $T_w$  – температура охлаждающей воды.

Коэффициент теплопередачи определяется графически. На рис. 2 представлена зависимость данного коэффициента от размеров преобразователя и скорости охлаждающей жидкости.

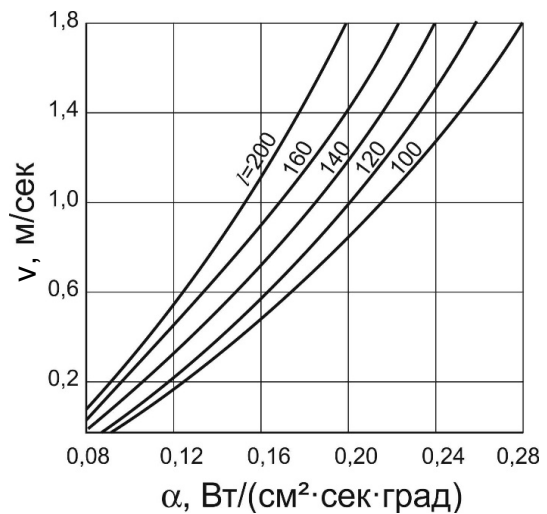


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопередачи от размеров преобразователя и скорости охлаждающей жидкости

$T_m = 100^\circ\text{C}$  и  $T_w = 20^\circ\text{C}$ . Тогда допустимая мощность потерь  $PL$  равна:

$$PL = S_c \alpha (T_m - T_w) = 261 \cdot 0,13(100 - 20) = 2714,4 \text{ Вт/с}$$

Отсюда, максимально допустимая электрическая мощность возбуждения разрабатываемого пакета УКС при  $\eta_{за} = 0,3$  будет составлять:

$$P_e = \frac{PL}{1 - \eta_{за}} = \frac{2714,4}{1 - 0,3} = 3877,7 \text{ Вт} \sim 3,9 \text{ кВт.}$$

Далее проводится расчет электрических параметров пакета УКС. Магнитодвижущая сила  $V_m$  (ампер-витки) определяется из выражения:

$$V_m = H_m \cdot l_{cp},$$

где  $H_m$  – амплитуда переменного магнитного поля, которая находится для определенного материала сердечника по экспериментальной кривой зависимости  $B(H)$ ;  $l_{cp}$  – средняя длина магнитного пути (магнитной цепи) сердечника, равная:

$$l_{cp} = 2(l - d) + 2(a + c) = 2(110 - 14) + 2(14 + 12) = 241,9 \text{ мм.}$$

$$V_m = H_m \cdot l_{cp} = 0,6 \cdot 103 \cdot 0,242 = 145,2 \text{ А/м.}$$

Зная  $H_m$ ,  $l_{cp}$ , общее количество витков  $m$  на стержнях сердечника, можно определить амплитуду тока возбуждения:

$$I_{me} = \frac{V_m}{m} = \frac{(H_m \cdot l_{cp})}{m}.$$

На практике количество витков определяется, в первую очередь, свободным расположением провода обмотки диаметром  $d_w$ , на стержне сердечника в один ряд  $d_w \cdot m \leq 2h$ . Принимаем  $m = 10$ .

$$I_{me} = \frac{V_m}{m} = \frac{(H_m \cdot l_{cp})}{m} = \frac{145,2}{40} = 3,63 \text{ А.}$$

Величина тока подмагничивания равна  $I_o \approx 2I_{em} = 2 \cdot 3,63 = 7,26 \text{ А}$ . Эффективное значение полного тока определяется из выражения:

$$I_{eff} = \sqrt{I_{em}^2 + I_o^2}$$

$$I_{eff} = \sqrt{I_{em}^2 + I_o^2} = \sqrt{3,63^2 + 7,26^2} \approx 8,12 \text{ А.}$$

В данном случае  $I_{em}$  существенно меньше допустимой величины тока  $I_{el}$  при принятом сечении провода  $d_w = 1,5 \text{ мм}^2$ .

Амплитуда напряжения возбуждения равна:

$$U_{em} = \frac{P_e}{I_{em} \cdot \cos \varphi}$$

Для магнитоотрицательного преобразователя с сердечником из пермендюра  $\cos \varphi$  находится в пределах  $0,6 \dots 0,8$ . Тогда  $U_{em}$  равняется:

$$U_{em} = \frac{P_e}{I_{em} \cdot \cos \varphi} = \frac{3878}{3,63 \cdot \cos(0,8)} = 744,4 \text{ В.}$$

Основной характеристикой любой УКС является амплитуда колебательных смещений  $\xi_m$  на ее рабочем торце при заданной частоте, из-

меряемая в микрометрах.

Отношение амплитуд колебательной скорости на входе и выходе равно отношению амплитуд смещений, поскольку:

$$v_m = 2\pi f_r \xi_m,$$

где  $v_m$  – амплитуда колебательной скорости;  $f_r$  – частота колебаний;  $\xi_m$  – амплитуда колебательных смещений.

Амплитуда колебательной скорости вычисляется как:

$$v_m = \frac{F_m}{R'_H + R_{МП}},$$

где  $F_m$  – вынуждающая сила;  $R'_H$  – приведенное сопротивление нагрузки;  $R_{МП}$  – сопротивление механических потерь, приведенное к выходному сечению.

При расчете магнитоотрицательного преобразователя используют следующие базовые соотношения:

$$F_m = (\sigma_M)_m S_1 q^{-1} \cos(\alpha_1)$$

$$R_{МП} = \frac{\rho c S_1}{Q} \left[ \alpha_1 + \frac{\alpha_2}{2q} (\cos^2 \alpha_1 + q^2 \sin^2 \alpha_1) \right]$$

$$\alpha_2 = \arctg(qctg\alpha_1),$$

где  $S_1$  – конечная площадь сечения волновода;  $\rho c$  – волновое сопротивление материала преобразователя;  $Q-1$  – коэффициент потерь в этом материале;  $(\sigma_M)_m$  – амплитуда магнитоотрицательных напряжений;  $\alpha_1 = \frac{2\pi f}{c} l_1$  – волновая длина накладки.

Амплитуда магнитоотрицательных напряжений  $(\sigma_M)_m$  является функцией амплитуды магнитной индукции  $B_m$ , создаваемой обмоткой преобразователя. Для расчетов при условии  $B_m < 0,5B_s$  функциональная зависимость  $\sigma_M(B)$  может быть представлена в виде:

$$(\sigma_M)_m = \lambda_{\phi} \cdot B_m,$$

где  $\lambda_{\phi}$  – эффективное значение магнитоотрицательной константы.

$$(\sigma_M)_m = \lambda_{\phi} \cdot B_m = 1,75 \cdot 10^{-7} \cdot 2,4 = 4,2 \cdot 10^{-7} \text{ Тл.}$$

$$\alpha_1 = \frac{2\pi f}{c} l_1 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 22000}{5200} \cdot 0,08 = 0,398 \text{ мм.}$$

$$F_m = (\sigma_M)_m S_1 q^{-1} \cos(\alpha_1) = 4,2 \cdot 10^{-7} \cdot 15 \cdot 0,7^{-1} \cdot \cos(0,398) = 8,29 \cdot 10^{-6} \text{ Тл} \cdot \text{мм}^2.$$

$$\alpha_2 = \arctg(q \text{ctg} \alpha_1) = \arctg(0,7 \cdot \text{ctg}(0,398)) = 1,029 \text{ мм}^2.$$

$$R_{\text{МП}} = \frac{\rho c S_1}{Q} \left[ \alpha_1 + \frac{\alpha_2}{2q} (\cos^2 \alpha_1 + q^2 \sin^2 \alpha_1) \right] = \frac{42,5 \cdot 15 \cdot 10^{-4}}{0,83} \left[ 0,398 + \frac{1,029}{2 \cdot 0,7} (\cos^2(0,398) + 0,7^2 \sin^2(0,398)) \right] = 6,7 \cdot 10^{-2} \text{ кг/с}.$$

Амплитуда колебательной скорости равна:

$$v_m = \frac{F_m}{R_H' + R_{\text{МП}}} = \frac{8,29 \cdot 10^{-6}}{R_H' + 6,7 \cdot 10^{-2}} = 1,23 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}.$$

Получив значение амплитуды колебательной скорости, можно найти значение амплитуды колебательных смещений на выходе с магнитострикционного преобразователя:

$$\xi_{\text{ВЫХ}} = \frac{v_m}{2\pi f r} = \frac{1,23 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 3,14 \cdot 22000} = 4,27 \text{ мкм}.$$

$$\xi_{\text{max}} = \frac{0,6\sigma_{-1}}{2\pi r c \cdot f r \cdot \varphi} = \frac{0,6 \cdot 500 \cdot 10^6}{2\pi \cdot 4500 \cdot 5060 \cdot 22000 \cdot 1} = 95,3 \text{ мкм}$$

Находим резонансную длину волновода:

$$l_0 = \frac{\lambda}{2} = \frac{0,23}{2} = 115 \text{ мм}.$$

Коэффициент усиления находится по следующей формуле:

$$K_v = \frac{S_0}{S_1} = \frac{0,001963}{0,000962} = 2,04,$$

где  $S_0$  – начальная площадь сечения волновода.

Зная амплитуду колебательных смещений на выходе с магнитострикционного преобразователя и коэффициент усиления, можно найти амплитуду колебательных смещений на конце волновода  $\xi_{\text{В}}$ :

$$\xi_{\text{В}} = \xi_{\text{ВЫХ}} \cdot K_v$$

Подставив значения в формулу, получим:

$$\xi_{\text{В}} = \xi_{\text{ВЫХ}} \cdot K_v = 4,27 \cdot 2,04 = 8,71 \text{ мкм}.$$

Для питания разработанной УКС был выбран ультразвуковой генератор УЗГ-2-22. Использование данного генератора целесооб-

Далее необходимо провести расчет волновода. Волновод представляет собой ступенчатый концентратор, припаянный к торцу магнитострикционного преобразователя. Расчет волновода включает в себя определение его резонансной длины и коэффициента усиления  $K_v$ . Использование ступенчатой формы волновода предпочтительней, поскольку она обеспечивает максимальный коэффициент усиления. В качестве материала использовался титановый сплав ВТЗ-1.

Необходимо найти максимально допустимую амплитуду колебательных смещений на выходе ступенчатого волновода, которую может обеспечить сплав ВТЗ-1.

$$\xi_{\text{max}} = \frac{0,6\sigma_{-1}}{2\pi r c \cdot f r \cdot \varphi},$$

где  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости сплава ВТЗ-1;  $\varphi$  – фактор формы, который связывает амплитуду ультразвуковых напряжений в пучности деформации с амплитудой колебательной скорости на выходном конце волновода.

разно для магнитострикционных преобразователей, так как отвечает запросам по мощности и напряжению для выполнения поставленных задач. Наличие систем автоматического подстройки частоты (АПЧ) резонанса и автоматического подстройки амплитуды (АПА) позволит обеспечить стабильность работы генератора в заданном режиме, что в рамках большой длительности процесса газового азотирования является важным фактором. Технические характеристики генератора УЗГ-2-22 представлены в табл. 1.

Способ интенсификации газового азотирования ультразвуковыми колебаниями [1] требует наличия большой площади излучающей поверхности, так как воздействию должен подвергаться весь замкнутый объем насыщающей среды, а также обуславливает необходимость обеспечения большой мощности излучения.

Среди различных типов ультразвуковых реакторов, применяемых в машиностроении для создания звуковых колебаний высокой интенсивности, в газовой среде обычно используются плоскостные излучатели мем-

бранного типа. Плоскостные излучатели используются для увеличения активной части

озвучиваемого объема.

1. Технические характеристики генератора УЗГ-2-22

Технические характеристики	Значение
Напряжение питания однофазное при 50 Гц, В	220 ± 10%
Максимальный входной ток, А	10
Максимальная входная мощность, кВА	2,2
Напряжение выходное, В	150...250
Максимальный выходной ток, А	20
Частота выходного напряжения, кГц	18...44
Коэффициент полезного действия, %	Более 95

В газовых средах акустические параметры излучателей, к которым можно отнести резонансную частоту, амплитуду колебаний и добротность, не изменяются. Исключительным фактором, при котором изменяется резонансная частота излучателя, является повышение температуры конструкции ультразвукового излучателя.

При конструировании установки ультразвукового воздействия в процессе газового азотирования рассматривались четыре вида излучателей мембранного типа: дисковый; с коническим переходом; с экспоненциальным переходом и со ступенчатым переходом (рис. 3). Резонансная расчетная частота для всех излучателей составляла 22 кГц. Фактическая резонансная частота отличалась от расчетной не более чем на 5 %.

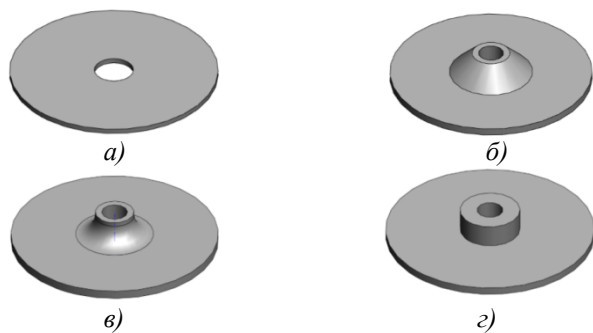


Рис. 3. Мембранные излучатели:

а – дисковый; б – с коническим переходом; в – с экспоненциальным переходом; з – со ступенчатым переходом

Дисковый излучатель представляет собой пластину из стали 40, диаметром 80 мм. Данный излучатель позволяет получить большую амплитуду, однако из-за акустических потерь в месте крепления не может использоваться длительное время, что делает его не пригодным для целей создания установки, так как процесс азотирования характеризуется значительной длительностью.

Экспоненциальный переход позволяет получить плавное распределение большой амплитуды колебаний на поверхности излучателя, что позволит озвучивать весь объем насыщающей среды по сравнению с предыдущими излучателями.

Для визуальной оценки распределения амплитуды на поверхность излучателей наносился тонкий слой мелкого дисперсного порошка. По скоплениям порошка определялась эффективность площади излучения акустической энергии. Кроме качественной картины была произведена количественная оценка, а именно с помощью индикатора часового типа снималась амплитуда и для каждого излучателя был построен график распределения амплитуды по поверхности (рис. 4).

Все излучатели исследовались при одинаковой мощности. Самая большая амплитуда также получена на мембранном излучателе с экспоненциальным переходом.

Таким образом, для разработки магнитострикционной ультразвуковой колебательной системы для интенсификации газового азотирования целесообразно использование мембранного излучателя с экспоненциальным излучателем. Предлагаемое технологическое решение позволит получить более равномерное распределение амплитуды ультразвуковых колебаний на поверхности излучающей пластины с хорошим акустическим контактом и со стабильными характеристиками при длительном времени работы в условиях высоких температур.

Для разрабатываемой УКС были рассчитаны следующие геометрические параметры сердечника преобразователя: ширина пластины 40 мм; ширина стержней 14 мм; ширина окна 12 мм; толщина накладок 15 мм; толщина набора пакета 37,5 мм; высота окна 80 мм; общая высота 110 мм. При разработке охлаждающей системы величина поверхности охлаждения сердечника составит 261 см<sup>2</sup>.

Выполнен расчет электрических парамет-

ров пакета УКС. Максимально допустимая электрическая мощность возбуждения разрабатываемого пакета УКС составит 3,9 кВт; величина тока подмагничивания – 7,26 А; эффективное значение полного тока – 8,12 А; амплитуда напряжения возбуждения – 744,4 В; амплитуды колебательных смещений на выходе с магнитострикционного преобразователя – 4,27 мкм; амплитуда колебательных смещений на конце волновода – 8,71 мкм. Для разрабатываемой УКС с целью интенсификации газового азотирования выбран ультразвуковой генератор УЗГ-2-22, так как его технические характеристики отвечают необходимым условиям при решении поставленных задач.

зователя – 4,27 мкм; амплитуда колебательных смещений на конце волновода – 8,71 мкм. Для разрабатываемой УКС с целью интенсификации газового азотирования выбран ультразвуковой генератор УЗГ-2-22, так как его технические характеристики отвечают необходимым условиям при решении поставленных задач.

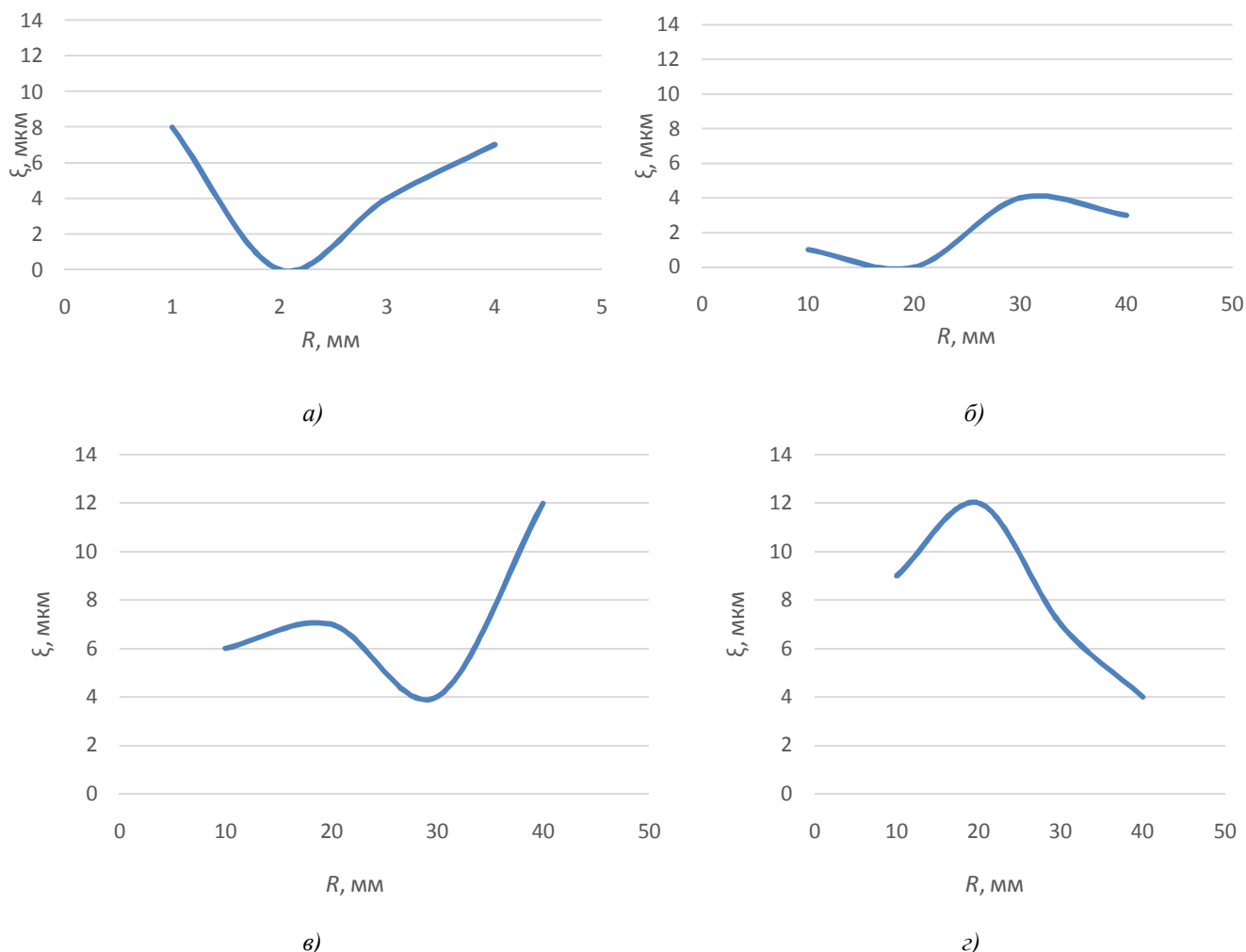


Рис. 4. Распределение амплитуды по поверхности излучателей:

а – дисковый; б – с коническим переходом; в – с экспоненциальным переходом; з – со ступенчатым переходом

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бритвин, Л.Н., Гаевский, В.В., Германова, В.А., Нигметзянов, Р.И., Приходько, В.М. Модифицирование поверхностного слоя в установке химико-термической обработки с наложением ультразвуковых колебаний // СТИН. – 2017. – №7. – С. 20-23.
2. Хмелев, В.Н., Леонов, Г.В., Барсуков, Р.В., Цыганок, С.Н., Шалунов, А.В. Ультразвуковые multifunctional и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2007. – 400 с.
3. Казанцев, В.Ф. Источники ультразвука. – М.: Техполиграфцентр, 2010. – 252 с.

### REFERENCES

1. Britvin, L. N., Gaevsky, V. V., Germanova, V. A., Nigmatzyanov, R. I., Prikhodko, V. M. Modification of the surface layer in the installation of chemo-thermal reprocessing with the oscillation superposition, STIN, 2017, no. 7, pp. 20-23.
2. Khmelev, V. N., Leonov, G. V., Barsukov, R. V., Tsyganok, S. N., Shalunov, A.V. Ultrasonic multifunctional and specialized devices for the intensification of technological processes in industry, agriculture and household, Biysk: Publishing house of Alt. state Technical University, 2007, 400 p.
3. Kazantsev, V. F. Sources of ultrasound. - M.: Techpoligrafstentr, 2010, 252 p.

Рецензент д.т.н.  
Лариса Георгиевна Петрова