АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том I 1955 Вып. 3

ПОЛУЧЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОСТОЯННОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ПРИ ОЗВУЧИВАНИИ В СОСУДЕ С НЕНАСТРОЕННЫМ ДНОМ

И. В. Скардс

Рассматривается вопрос о создании ультразвукового генератора, обеспечивающего неизменность интенсивности ультразвука при изменении расстояния между дном сосуда и излучателем. Для достижения этого сопротивление ультразвукового генератора было согласовано с суммой внутреннего сопротивления высокочастотного генератора и сопротивления, обусловленного потерями излучателя. Необходимое значение внутреннего сопротивления генератора может быть получено путем взаимной расстройки контура оконечной лампы (первичного контура) и контура кварцевого излучателя (вторичного контура). Экспериментально установлено, что стабилизировать интенсивность ультразвука удается в пределах 4%.

При облучении ультразвуком объектов, помещенных в ампулу, соприкасающуюся с контактной средой, бывает затруднительно измерить интенсивность ультразвука в ампуле. Вместе с тем, постоянство интенсивности является необходимым условием получения воспроизводимых результатов. Вследствие наличия отражения части звуковой энергии от дна ампулы и образования поля стоячих волн небольшие изменения расстояния могут привести к заметным изменениям интенсивности внутри ампулы. Точное же измерение расстояния между излучателем и ампулой затруднительно, так как для устранения кавитации в контактной среде необходимо изменять гидростатическое давление, для чего контактная среда герметизируется.

Указанные обстоятельства заставили нас сконструировать ультразвуковой генератор таким образом, чтобы интенсивность ультразвука не изменялась при изменении расстояния между дном сосуда и излучателем. Для этого оказалось необходимым согласовать сопротивление ультразвукового генератора с суммой внутреннего сопротивления высокочастотного генератора и сопротивления, обусловленного потерями излучателя. В качестве излучателя в опытах была применена плоская пьезокварцевая пластинка. Озвучиваемый материал помещался в плоскодонную стеклянную ампулу. Для достижения хорошего охлаждения объекта использовалась ампула с тонкими стенками.

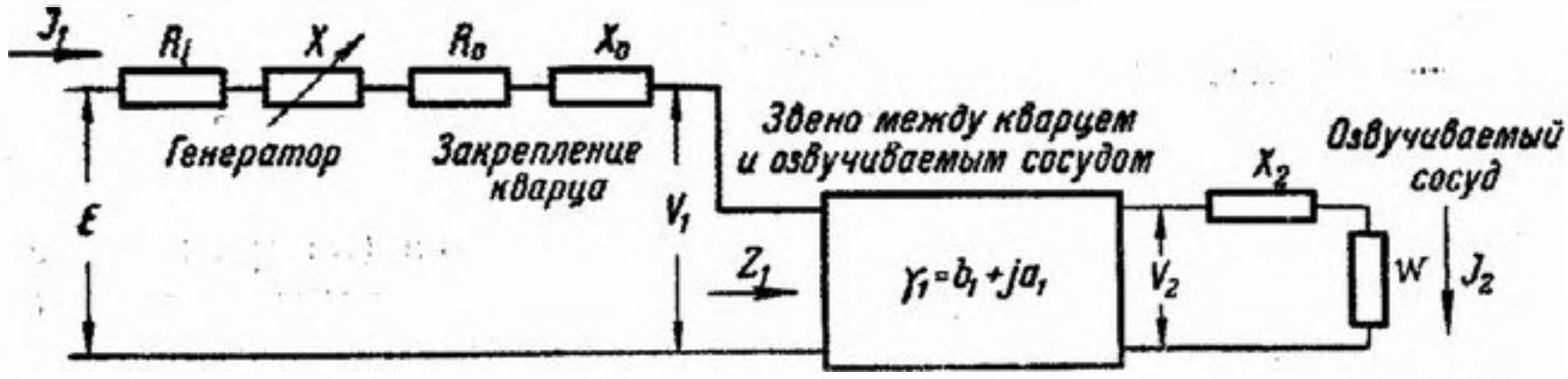
1. Согласование сопротивления ультразвукового генератора с суммой внутреннего сопротивления высокочастотного генератора тока и сопротивления, обусловленного потерями в подвеске кварца и в трансформаторном масле

На фиг. 1 представлена электрическая эквивалентная схема всего тракта, начиная от высокочастотного генератора и кончая озвучиваемым сосудом. Здесь R_i и X — активная и реактивная составляющие внутреннего сопротивления генератора, R_0 и X_0 — активная и реактивная составляющие сопротивления крепления излучателя; Z_1 — комплексное сопротивление звена между кварцем и озвучиваемым сосудом; w и X_2 — активная и реактивные части сопротивления озвучиваемого сосуда.

Для электрической линии, изображающей механическое звено между кварцем и озвучиваемым сосудом, существуют следующие соотношения:

$$V_1 = V_2 \operatorname{ch} \gamma_1 + I_2 w \operatorname{sh} \gamma_1, \qquad I_1 = \frac{V_2}{w} \operatorname{sh} \gamma_1 + I_2 \operatorname{ch} \gamma_1, \tag{1}$$

где V_1, I_1 — напряжение и ток на входе линии, V_2, I_2 — напряжение и ток на выходе линии, w — волновое (активное) сопротивление, $\gamma_1 = b_1 + ja_1$ — постоянная распространения для звена между излучателем и ампулой.



Фиг. 1. Эквивалентная схема ультразвукового излучателя

Если на выходе линии включено полное сопротивление $Z_2 = w \operatorname{th} \gamma_2$, где $\gamma_2 = b_2 + ja_2$ — постоянная распространения цепи нагрузки, то полное входное сопротивление можно выразить следующим образом:

$$Z_1 = w \frac{\operatorname{sh} 2(b_1 + b_2) + j \sin 2(a_1 + a_2)}{\operatorname{ch} 2(b_1 + b_2) + j \cos 2(a_1 + a_2)}.$$

Предположим, что $a_1 + a_2 = \frac{\pi}{2}(2k + 1)$, тогда $\cos 2(a_1 + a_2) = -1$, $\sin 2(a_1 + a_2) = 0$ и $z_1 = w \operatorname{cth}(b_1 + b_2)$.

Если предположить, что $a_1 + a_2 = \pi k$, то $\cos 2(a_1 + a_2) = +1$, $\sin 2(a_1 + a_2) = 0$ и $z_1 = w \operatorname{th}(b_1 + b_2)$.

В обоих этих случаях сопротивление Z_1 чисто активное. Реактивное сопротивление X_0 можно компенсировать путем изменения сопротивления X. Тогда в цепи с током I_1 получим чисто активное сопротивление

$$R = R_i + R_0 + Z_1.$$

При этом

$$R_{\max} = R_i + R_0 + w \operatorname{cth}(b_1 + b_2), \quad R_{\min} = R_i + R_0 + w \operatorname{th}(a_1 + a_2).$$

При перемещении ампулы заметно меняется только a_1, а вместе с ним и $a_1 + a_2$; остальные величины можно считать неизменными.

Для краткости изложения положим

$$a_1 + a_2 = x, \quad b_1 + b_2 = y.$$

Полное сопротивление в первичном контуре при скомпенсированном x_0, неизменном x и переменном расстоянии между ампулой и излучателем дается выражением

$$z = R_i + R_0 + w \operatorname{th}(Y + jX). \tag{2}$$

Ток в первичном контуре

$$I_1 = \frac{E}{R_i + R_0 + w \operatorname{th}(Y + jX)}.$$

Между токами первичного и вторичного контуров существует соотношение

$$I_2 = I_1 \frac{\operatorname{ch}(b_2 + ja_1)}{\operatorname{ch}(Y + jX)}.$$

Тогда

$$I_2 = \frac{E \operatorname{ch}(b_1 + ja_2)}{(R_i + R_0)\operatorname{ch}(Y + jX) + w \operatorname{sh}(Y + jX)}$$

или

$$I_2 = \frac{E \operatorname{ch}(b_2 + ja_2)}{[(R_1 + R_0)\operatorname{ch} Y + w \operatorname{sh} Y]\cos X + j\,[(R_i + R_0)\operatorname{sh} Y + w \operatorname{ch} Y]\sin X}. \qquad (3)$$

Числитель правой части последнего выражения не зависит от координат ампулы и, следовательно, остается неизменным при изменении ее положения. Поэтому I_2 изменяется только с изменением знаменателя.

Введем вспомогательные переменные

$$\xi = [(R_i + R_0)\operatorname{ch} y + w \operatorname{sh} y]\cos x, \quad \eta = [(R_i + R_0)\operatorname{sh} y + w \operatorname{ch} y]\sin x. \qquad (4)$$

Соотношения (4) представляют уравнение эллипса (в параметрической форме), полуоси которого равны выражениям в квадратных скобках.

Если $R_i + R_0 = w$, то выражения в квадратные скобках совпадают, и эллипс превращается в круг. Тогда абсолютное значение I_2 постоянно, и выходная мощность, выделяющаяся на сопротивлении w, не, зависит от значений x и y. Для достижения этого необходимо подобрать эквивалентный генератор с таким внутренним сопротивлением R_i, чтобы оно в сумме с сопротивлением закрепления R_0 равнялось сопротивлению нагрузки w:

$$R_i + R_0 = w.$$

Определим напряжение V_2 на нагрузке.

Напряжение холостого хода

$$E = (R_i + R_0) I_1 + V_1. \qquad (5)$$

При холостом ходе $I_2 = 0$, тогда из (1) получим

$$V_1 = V_2 \operatorname{ch} \gamma_1, \quad I_1 = \frac{V_2}{w} \operatorname{sh} \gamma_1.$$

Подставляя эти значения в выражение (5) и учитывая, что $R_i + R_0 = w$, получаем

$$E = \left[\frac{R_i + R_0}{w} \operatorname{sh} \gamma_1 + \operatorname{ch} \gamma_1\right] V_2 = e^{\gamma_1} V_2 = e^{b_1 + ja_1} V_2.$$

Отсюда видно, что $|V_2|$ изменяется равномерно, как Ee^{-b_1}; изменение a_1 меняет только фазу V_2, не изменяя абсолютного значения V_2. При любом сопротивлении нагрузки ток через это сопротивление не зависит от a_1. Следовательно, независимость выделяемой мощности в ампуле от расстояния между ампулой и излучателем достигается не только при нагрузке активным сопротивлением w, но и при любом сопротивлении, включенном последовательно с реактивным сопротивлением X_2.

Если $R_i + R_0 \neq w$, то абсолютное значение V_2 меняется с изменением $x = a_1 + a_2$. Для достижения равенства необходимо изменить величину внутреннего сопротивления генератора R_i.

Рассмотрим два случая.

1. Нагрузка получает максимальное количество энергии при $I_1 = I_{1\min}$ $(R = R_{\max})$, при этом $x = a_1 + a_2 = \frac{\pi}{2}(2k + 1)$.

Тогда

$$\cos x = 0, \quad \sin x = \pm 1,$$

абсолютное значение знаменателя (3), равное

$$(R_i + R_0)\operatorname{sh} y + w \operatorname{ch} y,$$

соответствует малой полуоси эллипса (4):

$$(R_i + R_0)\,\mathrm{sh}\,y + w\,\mathrm{ch}\,y < (R_i + R_0)\,\mathrm{ch}\,y + w\,\mathrm{sh}\,y.$$

Отсюда следует, что

$$R_i + R_0 > w.$$

Для выполнения условия $R_i + R_0 = w$ необходимо уменьшить R_i.

2. Нагрузка получает максимальное количество энергии при $I_1 = I_{1\max}$ $(R = R_{\min})$, при этом $x = a_1 + a_2 = \pi k$, $\cos x = \pm 1$, $\sin x = 0$; малой полуоси эллипса (4) соответствует следующее значение знаменателя (3):

$$(R_i + R_0)\,\mathrm{ch}\,y + w\,\mathrm{sh}\,y.$$

Тогда

$$(R_i + R_0)\,\mathrm{ch}\,y + w\,\mathrm{sh}\,y < (R_i + R_0)\,\mathrm{sh}\,y + w\,\mathrm{ch}\,y$$

и

$$R_i + R_0 < w.$$

В этом случае R_i следует увеличить.

2. Определение параметров линии, эквивалентной механическому звену между кварцем и сосудом.

Для определения параметров эквивалентной линии проведены следующие эксперименты:

1. Выяснено внутреннее сопротивление высокочастотного генератора. Для этого исследована работа генератора с различными нагрузками, состоявшими из активного сопротивления и конденсатора, которым компенсировалось индуктивное сопротивление генератора.

2. Генератор приключался к ультразвуковому излучателю, облучавшему пустой плоскодонный сосуд. Отмечались максимальный и минимальный токи в контуре, наблюдавшиеся при перемещении плоскодонного сосуда.

3. Ультразвуковой излучатель облучал плоскодонный сосуд, наполненный водой; при перемещении сосуда отмечались максимальный и минимальный токи в контуре.

4. Ультразвуковой излучатель работал с ватой, помещенной вместо сосуда; ватой поглощалась звуковая энергия.

Так как параметры линии вычислялись на основании измеренных малых разностей токов, была необходима высокая точность измерения тока в цепи излучателя. Во всех случаях ток измерялся при помощи лампочек накаливания, интенсивность света которых фотометрировалась. Такой метод определения тока дает более точные результаты, чем измерение прибором с термопарой, так как незначительные изменения тока, текущего через лампочки накаливания, вызывают значительные изменения интенсивности их свечения.

Измеренные указанным методом сопротивления соответствуют:

$z_I = w\,\mathrm{th}\,b_1 + R_0$ и $z_{II} = \dfrac{w}{\mathrm{th}\,b_1} + R_0$ — при пустом сосуде;

$z_{III} = \nu\,\mathrm{th}\,(b_1 + b_2) + R_0$ и $z_{IV} = \dfrac{\nu}{\mathrm{th}\,(b_1 + b_2)} + R_0$ — при наполненном сосуде;

$z_V = w + R_0$ — при заполнении ватой.

Для определения параметров получены следующие соотношения:

$$R_0 = \frac{z_I z_{II} - z_V^2}{z_I - z_{II} - 2z_V} = \frac{z_{III} z_{IV} - z_V^2}{z_{III} + z_{IV} - 2z_V},$$

$$w = z_V - R_0, \qquad \operatorname{th} b_1 = \frac{z_I - R_0}{w}, \qquad \operatorname{th}(b_1 + b_2) = \frac{z_{III} - R_0}{w},$$

и для определения a_2:

$$w \operatorname{Re}(\operatorname{th} \gamma_2) = w \frac{\operatorname{th} 2b_2}{\operatorname{ch} 2b_2 + \cos 2a_2} = w.$$

Отсюда следует:

$$\cos 2a_2 = \operatorname{sh} 2b_2 - \operatorname{ch} 2b_2 = -e^{-2b_2},$$

что дает абсолютное значение a_2.
Например, при $b_2 = 0{,}4$

$$\cos 2a_2 = -0{,}4493, \qquad 2a_2 = \pm[180° - 63°{,}3] = 116°{,}7, \qquad a_2 = \pm 58°{,}35.$$

Значение X_2 находим из выражений

$$X_2 = w \frac{\sin 2a_2}{\operatorname{ch} 2b_2 + \cos 2a_2}, \quad X_2 = \pm w \frac{0{,}8934}{1{,}3374 - 0{,}4493}, \quad X_2 = \pm w \frac{0{,}8934}{0{,}8881} \approx \pm w.$$

3. Измерение интенсивности ультразвука

Для определения интенсивности ультразвука в ампуле нами применялись три метода.

1. Метод, в котором используется изменение оптической прозрачности бактериальной взвеси при озвучивании.

2. Метод, при котором интенсивность характеризуется разницей между установившейся температурой в ампуле и температурой охладителя. Для определения температуры в ампуле применялось термосопротивление в виде тонкой проволочной спирали. На основании измерений температуры в ампуле до и после озвучивания строились графики разности между температурами в ампуле и в охладителе в функции от квадрата силы тока в цепи кварца. Калибровка системы в абсолютных интенсивностях осуществлялась с помощью вспомогательной проволочной спирали, помещенной в ампулу и нагреваемой постоянным током. Сопоставляя значения превышений температуры в ампуле при озвучивании с нагреванием спиралью и без нагревания, можно было определить абсолютные интенсивности, отвечающие определенным значениям тока в цепи кварца.

3. Метод, при котором интенсивность определяется по скорости повышения температуры в ампуле.

Первый из перечисленных методов дает относительную характеристику интенсивности в разных условиях озвучивания, остальные два дают непосредственно абсолютную интенсивность ультразвука. Исследуя описанными методами изменения интенсивности ультразвука в ампуле и считая волновод линейным, мы проверили пригодность изложенной выше теории согласования.

4. Проверка теории согласования

Соотношение (3) позволяет вычислить $|I_2|$. Обозначим $I_{1\min}$ [при $x = \frac{\pi}{2}(2k+1)$], соответствующее I_2, через I_{21}, а $I_{1\max}$ [при $x = \pi k$], соответствующее I_2, через I_{22}.

Тогда

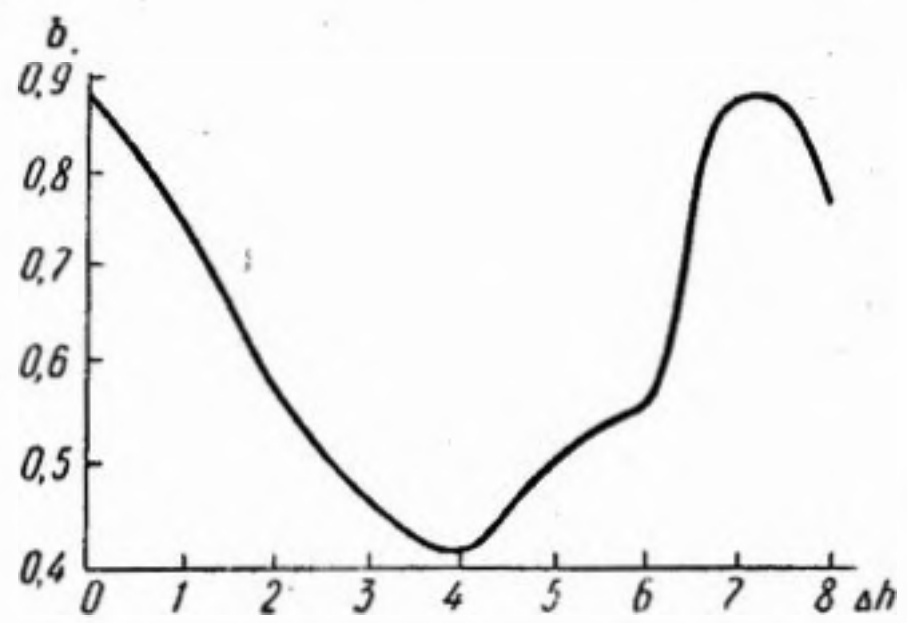
$$\frac{I_{21}}{I_{22}} = \frac{(R_i + R_0)\,\mathrm{sh}\,y + \nu\,\mathrm{ch}\,y}{(R_i + R_0)\,\mathrm{ch}\,y + \nu\,\mathrm{sh}\,y}. \tag{6}$$

Из результатов измерений следует, что $b_1 \approx 0{,}4$, $b_2 \approx 0{,}4$, $y \approx 0{,}8$. Так как $\mathrm{th}\,0{,}8 \approx \frac{2}{3}$, то в этом случае

$$\frac{I_{21}}{I_{22}} = \frac{2(R_i + R_0) + 3w}{3(R_i + R_0) + 2w}; \qquad \frac{R_i + R_0}{w} = \frac{3I_{22} - 2I_{21}}{3I_{21} - 2I_{22}}. \tag{7}$$

Сравним экспериментальную и вычисленную мощности в нагрузке в зависимости от расстояния между ампулой и излучателем при различных соотношениях между сопротивлениями $R_i + R_0$ и w.

1. Если значение отношения $\frac{R_i + R_0}{w}$ очень велико или очень мало, то вычисленное отношение $I_{2\max}$ и $I_{2\min}$ близко к 1,5, и отношение максимальной полученной энергии к минимальной примерно равно 2,25. Это совпадает с результатами проведенных экспериментов, представленных на фиг. 2. На графике по оси абсцисс отложено изменение Δh расстояния h ампулы от излучателя в см. По оси ординат отложена интенсивность ультразвука B в относительных единицах. Озвучивание производилось при постоянном значении тока в цепи излучателя.



Фиг. 2. Зависимость интенсивности ультразвука от перемещения ампулы относительно излучателя, когда отношение $\frac{R_i + R_0}{w}$ очень велико или очень мало

2. Произведена проверка зависимости энергии в ампуле от расстояния между ампулой и излучателем при внутреннем сопротивлении генератора $R_i = 650$ ом, $R_0 = 250$ ом, $w = 600$ ом. При этих значениях сопротивлений $R_i + R_0 = 900$ ом $\approx 1{,}5\,w$.

При измерениях получены следующие значения параметров

$$b_1 \approx 0{,}4 \text{ и } b_2 \approx 0{,}4.$$

Тогда

$$y = b_1 + b_2 = 0{,}8,$$

$$\mathrm{ch}\,y = 1{,}337, \qquad \mathrm{sh}\,y = 0{,}888.$$

Из соотношения (4) вытекает, что крайние величины знаменателя выражения (3) равны

$$\begin{aligned} \xi_0 &= (R_i + R_0)\,\mathrm{ch}\,0{,}8 + w\,\mathrm{sh}\,0{,}8 = 2{,}89\,w \text{ (что соответствует } I_{2\min}), \\ \eta_0 &= (R_i + R_0)\,\mathrm{sh}\,0{,}8 + w\,\mathrm{ch}\,0{,}8 = 2{,}67\,w \text{ (что соответствует } I_{2\max}). \end{aligned} \tag{8}$$

Следовательно

$$I_{22} = 1{,}1\,I_{21}.$$

При изменении I_2 на 10% энергия в нагрузке меняется на 20%, что совпадает с результатами проведенных экспериментов, изображенных на графике фиг. 3. По осям отложены те же величины, что на фиг. 2.

3. Экспериментально установлена независимость энергии, поступающей в ампулу, от расстояния между излучателем и ампулой при полном согласовании сопротивлений:

$$R_i = 325 \text{ ом}, \qquad R_0 = 250 \text{ ом}, \qquad w = 600 \text{ ом}.$$

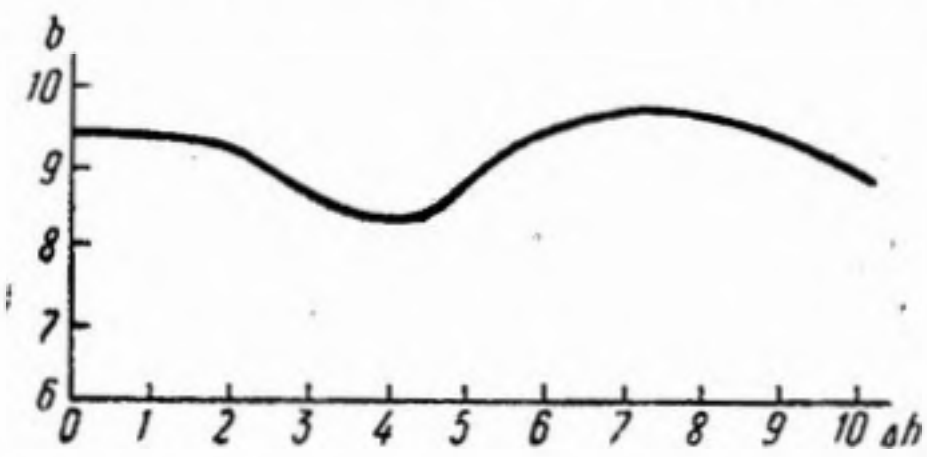
Тогда

$$R_i + R_0 \approx w, \qquad \xi_1 = \eta_1 = w(\operatorname{ch} 0{,}8 + \operatorname{sh} 0{,}8) = 2{,}23w,$$

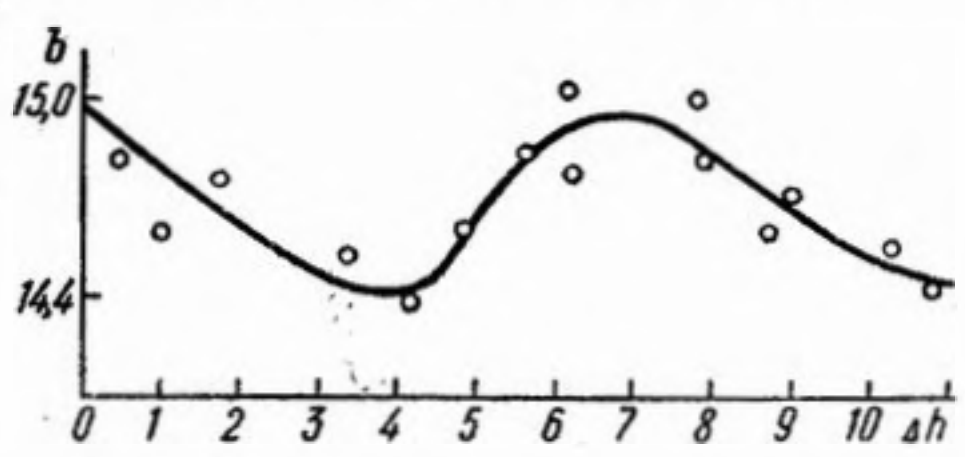
при этом

$$I_2 = I_{20} = \text{const}.$$

Результаты экспериментов приведены на фиг. 4, где обозначения те же, что и на двух предыдущих фигурах. Из графика видно, что при изменении расстояния между излучателем и ампулой наибольшее различие между энергиями, поступающими в ампулу, не превосходит 4%.



Фиг. 3. Зависимость интенсивности ультразвука от перемещения ампулы относительно излучателя при $\frac{R_i + R_0}{w} = 1{,}5$



Фиг. 4. Зависимость интенсивности ультразвука от перемещения ампулы относительно излучателя при полном согласовании: $R_i + R_0 \approx w$

4. Сравним случай полного согласования сопротивлений со случаем, которому соответствует выражение (8).

Отношение токов в нагрузке:

$$\frac{I_{20}}{I_2} = \frac{2{,}89}{2{,}23} = 1{,}25, \qquad \frac{I_{20}}{I_1} = \frac{2{,}67}{2{,}23} = 1{,}20.$$

Отношение энергий в нагрузке

$$\left(\frac{I_{20}}{I_2}\right)^2 = 1{,}56, \qquad \left(\frac{I_{20}}{I_1}\right)^2 = 1{,}43.$$

Полученные цифры показывают, что при полном согласовании сопротивлений энергия, выделенная в нагрузке, возрастает на 56% по отношению к прежней минимальной и на 43% по отношению к прежней максимальной энергии. Это также совпадает с результатами проведенных экспериментов.

5. Передача ультразвука через дно сосуда

Коэффициент прохождения D через дно ампулы можно определить из известного соотношения

$$D = \frac{4\left(\frac{\rho_2\vartheta_2}{\rho_1\vartheta_1}\right)^2}{4\left(\frac{\rho_2\vartheta_2}{\rho_1\vartheta_1}\right)\cos^2\frac{2\pi d}{l_2} + \left[\left(\frac{\rho_2\vartheta_2}{\rho_1\vartheta_1}\right)^2 + 1\right]^2 \sin^2\frac{2\pi d}{l_2}},$$

где d — толщина дна ампулы, l_2 — длина ультразвуковой волны в материале ампулы, ϑ_2 — скорость распространения звука в материале ампулы, ϑ_1 — скорость распространения звука в контактной среде, ρ_2 — плотность материала ампулы, ρ_1 — плотность контактной среды. Если стеклянная ампула с дном толщиной $d = 0{,}3$ мм помещена в воду, то вычисленный при помощи этого соотношения коэффициент прохождения звука $D = 0{,}7$. При изменении толщины дна ампулы на 10% передача интенсивности ультразвука в ампулу меняется на 3%.

Обратимся снова к эквивалентной схеме фиг. 1. Изменение толщины дна ампулы, с точки зрения изменения интенсивности ультразвука в

ампуле, эквивалентно изменению реактивного сопротивления X_2. При согласованном входе $R_i + R_0 = w$, если смотреть со стороны нагрузки, нагрузку питает источник с э. д. с.

$$V_2 = e^{-0,4-ja_1}E = e^{-ja_1}0,670E$$

и внутренним сопротивлением w. При $X_2 = 0$ полное сопротивление цепи равно $2w$; при $|x_2| = w$ полное сопротивление равняется $2w \pm jw$, абсолютное значение полного сопротивления равняется $\sqrt{2^2+1}\,w = \sqrt{5}\,w$. Отношение токов в нагрузке при этих значениях сопротивления x_2

$$\frac{I_{2(X_2=0)}}{I_{2(X_2=w)}} = \frac{\sqrt{5}}{2} \approx 1,12.$$

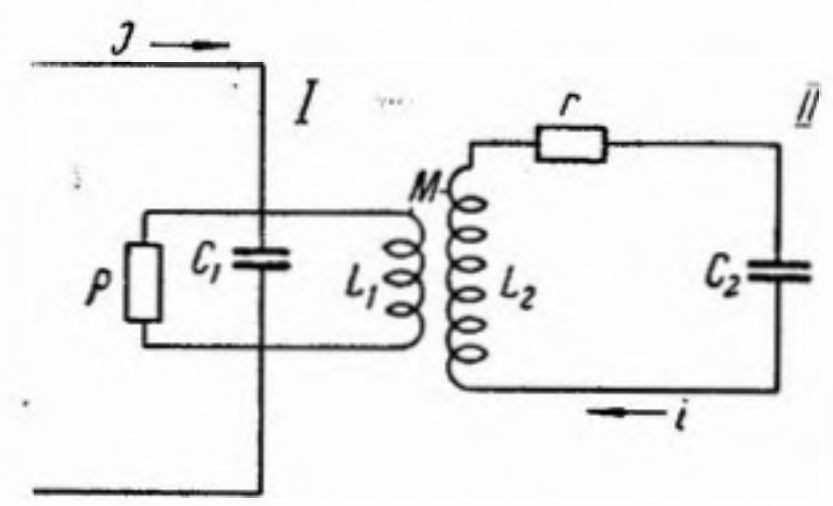
Отношение мощностей, выделяемых в нагрузке:

$$\frac{P_{(X_2=0)}}{P_{(X_2=w)}} = \frac{5}{4} = 1,25.$$

Мощность, выделяемая в нагрузке при $X_2 = 0$, на 25% больше, чем при $X_2 = w$.

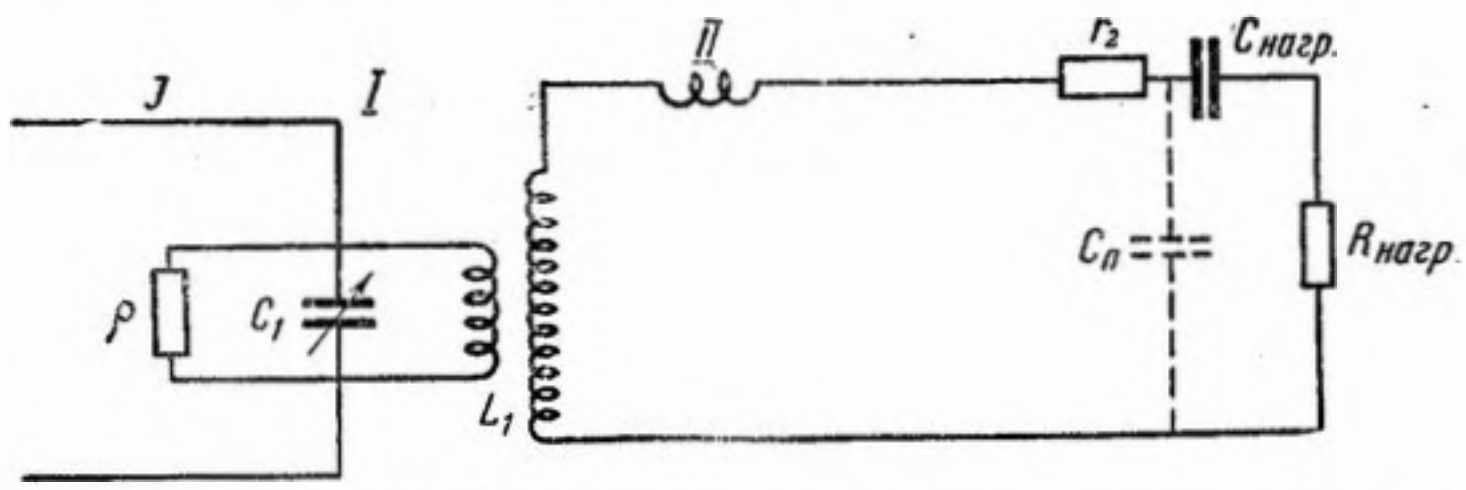
6. Определение оптимальных расстроек выходных контуров высокочастотного генератора

На фиг. 5 представлена схема выходных контуров генератора. Контур I присоединен к оконечной лампе генератора, в контур II входит излучатель, у которого активное сопротивление равно r, емкость — C_2. На схеме L_1, C_1, и ρ — соответственно индуктивность, емкость и эквивалентное активное сопротивление первого контура, I — полный ток, текущий через первый контур, i и L_2 — ток и индуктивность во втором контуре, M — коэффициент взаимоиндукции.



Фиг. 5. Эквивалентная схема выходных контуров ультразвукового генератора

Покажем, что для изменения внутреннего сопротивления генератора достаточно изменить расстройку между контурами I и II. Рассмотрим контуры I и II в рабочих условиях. Заменяя оконечную лампу эквивалентным генератором тока с током короткого замыкания I и шунтирующей проводимостью ρ и вводя r_2 (сопротивление второго контура)



Фиг. 6. Схема выходных контуров ультразвукового генератора

и C_2 (побочная емкость), получаем изображенную на фиг. 6 эквивалентную схему генератора.

Реактивное сопротивление первого контура

$$X_1 = \omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}.$$

Реактивное сопротивление второго контура (см. фиг. 6)

$$X_0 + \xi = \omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}.$$

Реактивное сопротивление второго контура представлено в виде двух величин: начального сопротивления X_0 и дополнительного сопротивления ξ, которое изменяется приблизительно в пределах от $+200$ ом до -200 ом в зависимости от положения ампулы. Обозначив среднюю величину емкости C_2 через C_{20}, получим $X_0 = \omega L_2 - \frac{1}{\omega C_{20}}$.

Ток I дается выражением

$$I = -\frac{i}{\omega M}(rL_1\omega - j\omega C_1 X_1)\left\{r + \frac{rM^2\omega^2}{\rho^2\omega^2 L_1^2 + \omega^2 C_1^2 X_1^2} + \right.$$
$$\left. + j\left[\xi + X_0 - M^2\omega^2 \frac{\rho^2\omega L_1 - \omega^2 C_1 X_1}{\rho^2\omega^2 L_1^2 + \omega^2 C_1^2 X_1^2}\right]\right\}. \tag{9}$$

Изменение абсолютной величины тока i во втором контуре в зависимости от положения ампулы определяется изменением абсолютной величины, заключенной в последние скобки. Чтобы оставалось в силе соотношение (2), в квадратных скобках должно содержаться только ξ, т. е. должно быть

$$M\omega^2 = X_0 \frac{\rho^2\omega^2 L_1^2 + \omega^2 C_1^2 X_1^2}{\rho^2\omega L_1 + \omega^2 C_1^2 X_1}. \tag{10}$$

Это значит, что

$$X_0 = \frac{\omega^2 M^2}{\omega L_1}\left[1 + \frac{\omega C_1 X_1^2}{\rho^2\omega^2 L_1^2 + \omega^2 C_1^2 X_1^2}\right]. \tag{11}$$

Если это условие соблюдено, то

$$|i| = I\,\frac{S}{r + \rho S^2}, \tag{12}$$

где

$$S = \frac{\omega M}{\sqrt{\rho^2\omega^2 L_1^2 + \omega^2 C_1^2 X_1^2}}. \tag{13}$$

Как видно из соотношения (12), если I, r и ρ остаются неизменными, то величину $|i|$ определяет S. При согласовании сопротивлений значение внутреннего сопротивления генератора тока невелико. Поэтому необходимо определить, при каких значениях коэффициента взаимоиндукции M при оптимальных C_1 и L_2 внутреннее сопротивление генератора будет минимальным, если заданы L_1, C_{20}, r, ρ.

Ответ на этот вопрос дает соотношение (12). Как видно, M вместе с C_4 влияет на величину $|i|$ только через посредство S независимо от того, изменяется ли M или C. При этом должно быть соблюдено равенство (13). Таким образом, пока остается в силе соотношение (12), изменение M само по себе не может изменить внутреннее сопротивление. В принципе можно работать с каким-либо неизменяемым значением M, изменяя величину S при помощи C_1. Чтобы это было возможно, должно соблюдаться неравенство

$$M > S\rho L. \tag{14}$$

Таблица 1

X_1, $k\Omega$	$\rho^2\omega^2L_1^2+\omega^2C_1^2X_1^2$	X_0, $k\Omega$	$\rho S^2=\frac{M^2}{\rho^2L_1^2+C_1^2X_1^2}$ $k\Omega$	$R_i=\frac{C_н+C_п}{C_н}\times$ $\times(\rho S^2+r_2)$	X_0, $k\Omega$	R_i, $k\Omega$
−0,253	$3,4\cdot10^{-3}+100\cdot10^{-3}=$ $=103,4\cdot10^{-3}$	−0,042	0,0144	+0,443	−0,05	0,443
−0,125	$3,4\cdot10^{-3}+24,6\cdot10^{-3}=$ $=28,0\cdot10^{-3}$	−0,094	0,0533	+0,794	−0,08	0,603
0,049	$3,4\cdot10^{-3}+3,7\cdot10^{-3}=$ $=7,1\cdot10^{-3}$	−0,156	0,210	2,104	0,16	2,1
0,076	$3,4\cdot10^{-3}+0,09\cdot10^{-3}=$ $=3,49\cdot10^{-3}$	+0,076			+0,07	

Если теперь известны все величины, за исключением L_2, то величина X_0 из соотношения (11) определит оптимальное значение L_2.

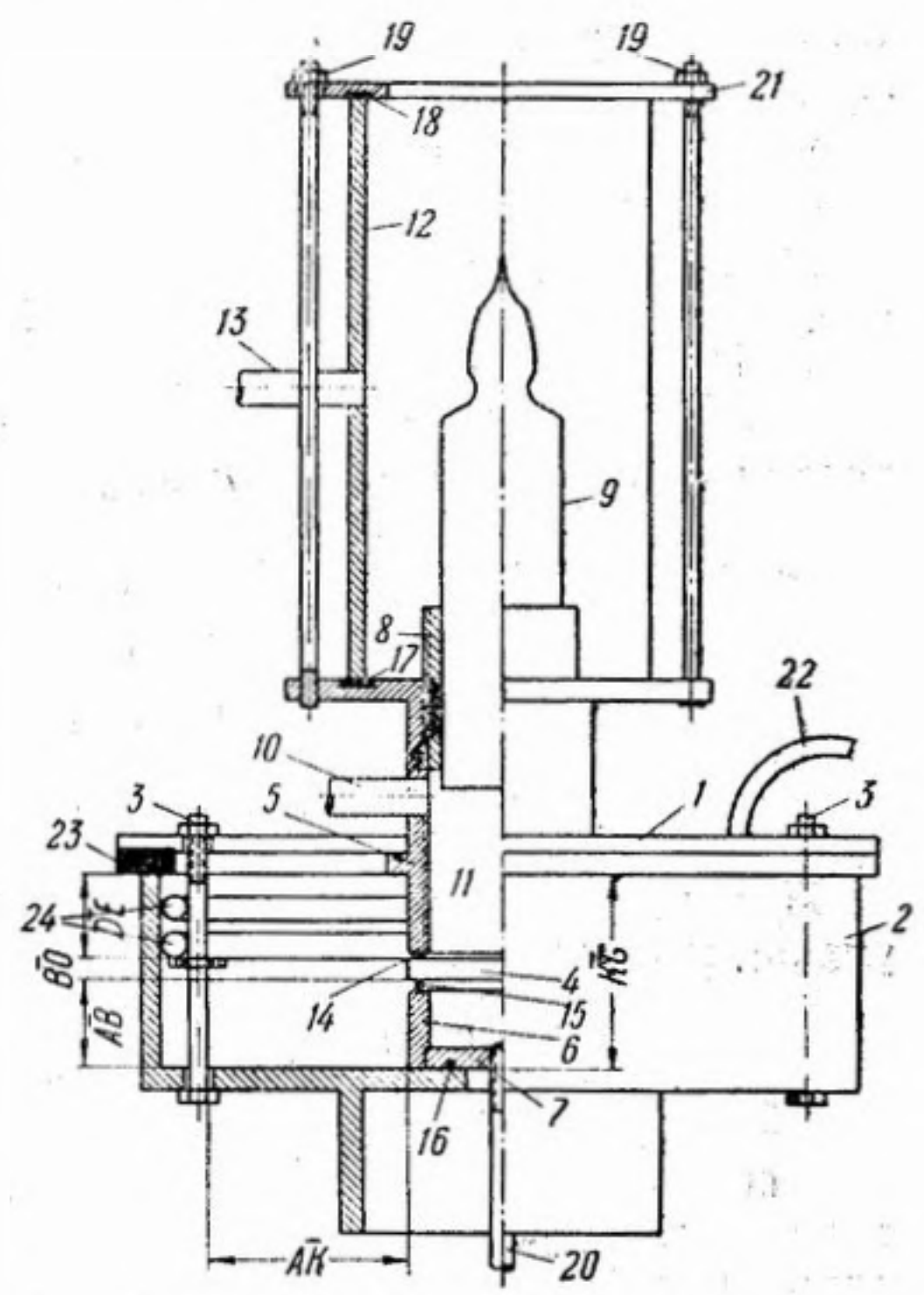
Остается только разрешить вопрос об определении оптимального S. Минимальное внутреннее сопротивление генератора тока дает соотношение (12), если $S\to0$, но тогда также $|i|\to0$. Максимальное значение $|i|$ при данных I, r, ρ получается при значении S:

$$S=\sqrt{\frac{r}{\rho}}.$$

Из приведенного видно, что изменить внутреннее сопротивление генератора можно путем расстройки выходного контура; например, при (см. фиг. 6) $\rho=73\cdot10^{-3}mS$, $\omega L_1=0,8\ k\Omega$, $r_2=0,034\ k\Omega$,

$$\frac{\omega^2M}{\omega L}=0,02\,k\Omega,\left(\frac{C_н+C_п}{C_н}\right)^2=9,$$

$$\frac{1}{\omega C_н}\gg R_н.$$



Фиг. 7. Конструкция устройства для облучения ампулы

В табл. 1 приведено сравнение вычисленных и экспериментально полученных значений величин.

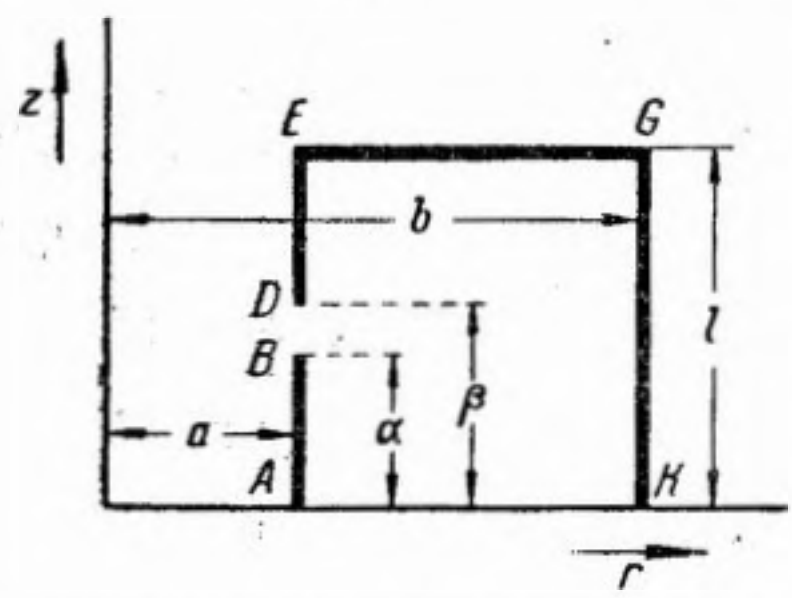
Для получения малого внутреннего сопротивления генератора тока необходимо снижать величину побочной емкости $C_п$.

7. Снижение побочной емкости держателя кварца

а) Конструкция устройства для облучения ампулы (фиг. 7).

При помощи металлического диска *1*, специальной фарфоровой детали *2* и винтов *3* кварцевый кристалл *4* укрепляется между двумя цилиндрами *5*, *6*, посредством которых подается на кристалл высокочастотное напряжение. Один конец нижнего цилиндра *6* закрыт металличес-

кой пластинкой 7. В верхнем цилиндре *5* укрепляется держатель ампулы *8*, при помощи которого можно установить расстояние ампулы от кварцевого кристалла *4*. По трубке *10* в пространство *11*, находящееся над кварцевым кристаллом, протекает вода, которая омывает ампулу и вытекает по трубке *13* из стеклянного цилиндра *12*. Кристалл *4* отделяется от окружающего пространства свинцовой прокладкой *14*, *15*. Кроме того, в систему держателя кристалла входят также резиновые прокладки *16*, *17*, *18*, винты *19*, служащие для закрепления стеклянного цилиндра *12*, стержень для подвода высокочастотного напряжения *20* и диск для укрепления стеклянного цилиндра *21*. Масло охлаждается трубчатым охладителем *24*, сосуд *2* герметизируется прокладками *23*.



Фиг. 8. Упрощенная схема держателя кварца

Устройство подключено к замкнутой охлаждающей системе с термостатом и насосом для циркуляции; в качестве охладителя применяется 17%-ный раствор спирта в воде.

б) Влияние изменения некоторых размеров кварцедержателя на побочную емкость держателя кварца

Упрощенная схема держателя кварца изображена на фиг. 8 (ср. с фиг. 7).

Если предположить, что нижняя часть держателя имеет потенциал +1, а верхняя 0, то потенциал U между держателем, металлическим диском и болтами отвечает следующим краевым условиям:

$$\begin{aligned}
&U = 1 \text{ по } AB, \text{ т. е. } && r = a, && 0 \leqslant z \leqslant \alpha,\\
&U = 0 \text{ » } DE, \text{ » » } && r = a, && \beta \leqslant z \leqslant l,\\
&U = 0 \text{ » } EG, \text{ » » } && a \leqslant r \leqslant b, && z = l,\\
&U = 0 \text{ » } GK, \text{ » » } && r = b, && 0 \leqslant z \leqslant l.
\end{aligned}$$

Потенциал между B и D определяет главным образом кварц. Для упрощения вычисления принято, что потенциал меняется линейно, т. е.

$$U = \frac{\beta - z}{\beta - \alpha} \text{ по } BD, \text{ т. е., если } r = a,\ \alpha \leqslant z \leqslant \beta.$$

Пренебрегая емкостями, которые дают задние стороны болтов и охладительных трубок, можно предположить, что точки A и K соединены одной и той же силовой линией, т. е.

$$\frac{\partial U}{\partial z} = 0 \text{ на } AK, \text{ т. е., если } 0 \leqslant r \leqslant b,\ z = 0.$$

Обозначим

$$a' = \frac{2a}{\pi l}, \qquad b' = \frac{2b}{\pi l}, \qquad \alpha' = \frac{2\alpha}{\pi l}, \qquad \beta' = \frac{2\beta}{\pi l}.$$

Емкость в см. для нижней части держателя определяется следующим выражением:

$$C = \frac{a\varepsilon_2}{2}\left\{\frac{4}{\pi(\beta' - \alpha')}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{\cos(2n+1)\alpha' - \cos(2n+1)\beta'}{(2n+1)^2}\sin(2n+1)z_0 \times \right.$$
$$\left. \times \frac{T_0(b')B_1(a') + B_0(b')T(a')}{T_0(b')B_0(a') - B_0(b')T_0(a')}\right\}. \qquad (15)$$

Здесь

$$T_0(X) = J_0(iX), \qquad B_0(X) = iH_0^{(1)}(iX),$$
$$T_1(X) = -iJ_1(iX), \qquad B_1(X) = -H_1^{(1)}(iX),$$

для масла $\varepsilon_2 = 2{,}2$.

В табл. 2 приведены вычисления значений емкости для различных l, a и b.

Таблица 2

l см	a см	b см	α см	$\beta-\alpha$ см	C пкфд
6,65	3,0	8,0	2,79	0,64	6,17
5,00	3,0	8,0	2,79	0,64	6,35
6,00	2,25	6,11	2,79	0,64	5,26
6,00	2,25	7,64	2,79	0,64	4,90
6,00	2,25	9,16	2,79	0,64	4,69
6,65	2,25	6,06	2,79	0,64	5,30
6,65	2,25	7,50	2,79	0,64	5,00
6,65	2,25	8,50	2,79	0,64	4,85

Из результатов следует, что небольшие изменения величин l и b мало влияют на емкость.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. Bergmann. Der Ultraschall und seine Anwendung Wissenschaft und Technik. 1954.

Институт микробиологии
Академии наук Латвийской ССР
г. Рига

Поступило в редакцию
21 марта 1955 г.