

КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ при СОВЕТЕ
МИНИСТРОВ СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ им. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

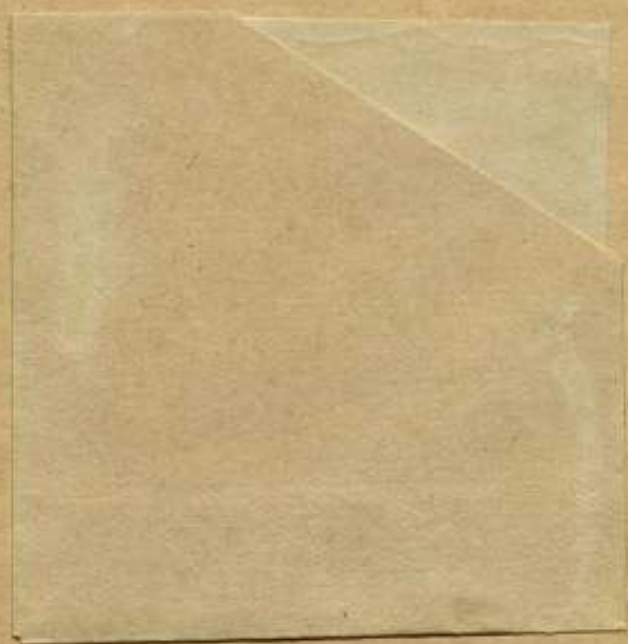
Б. К. ШЕМБЕЛЬ

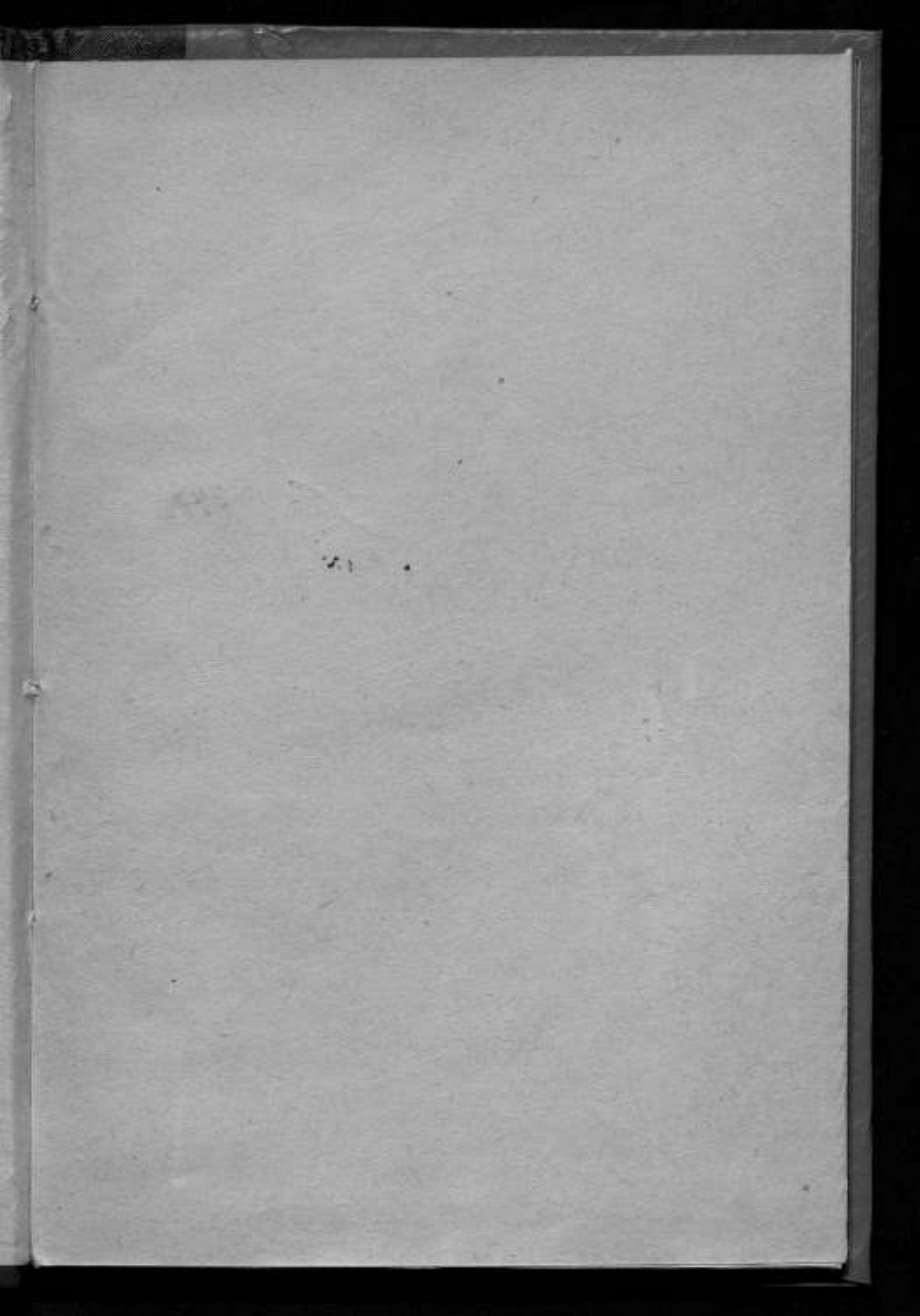
ИССЛЕДОВАНИЕ
ЭКВИВАЛЕНТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
КВАРЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА

Труды ВНИИМ

Выпуск 2 (62)

ИЗДАНИЕ ВНИИМ
ЛЕНИНГРАД — 1948







КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
при СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИИ им. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

Б. К. ШЕМБЕЛЬ

ИССЛЕДОВАНИЕ
ЭКВИВАЛЕНТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
КВАРЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА

ТРУДЫ ВНИИМ

ВЫПУСК 2 (62)

Под редакцией
проф. Б. А. Остроумова

№ 9746

ВНИИМ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИИ им. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ИЗДАНИЕ ВНИИМ
ЛЕНИНГРАД — 1948

Ответственный редактор профессор *В. М. Яновский*
Технический редактор *А. А. Дворниковская*
Корректор *Н. А. Киохи*

М-10469. Подписано к печ. 2/VII 1948 г. Тираж 1200 экз. Формат бум. $62 \times 94 \frac{1}{16}$
Уч.-авт. листов 4, 3 $\frac{1}{2}$ печ. л. Заказ № 1188.

1-я тип. Издательства Академии Наук СССР, Ленинград, В. О., 9 линия, 12.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КВАРЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА¹

Из трёх динамических параметров электрической эквивалентной схемы кварца: индуктивность, ёмкость и сопротивление, наиболее трудным для исследования является последний, так как он, в противоположность первым двум, обычно в большей степени зависит от технологии производства кварца, от конструкции держателя и прочих внешних условий, чем от физических констант кристалла.

Несмотря на то, что в литературе имеется довольно большое число работ, посвященных измерению и исследованию сопротивления кварца, этот параметр все же является наименее изученным и в ряде случаев представляется весьма затруднительным найти величину сопротивления кварца расчетным путем.

Однако развитие радиотехники настоятельно выдвигает вопрос о точном знании величин всех эквивалентных параметров кварца, а также об изучении зависимости их от внешних факторов.

Укажем на некоторые области радиотехники, где эти знания необходимы:

1. Расчет селективных цепей — кварцевых фильтров.
2. Создание кварцевых генераторов с чрезвычайно большой стабильностью частоты.

Эталоны частоты (кварцевые часы), а в последнее время и техника, требуют нестабильности частоты колебаний порядка $1 \cdot 10^{-9}$. Решить эту задачу можно, лишь тщательно изучив кварц, как эквивалентную электрическую колебательную систему.

3. Расчет кварцевых генераторов.

¹ Под термином «кварцевый резонатор» понимается брусок или пластинка, вырезанные из кристалла кварца и предназначенные для использования в радиотехнических устройствах в качестве колебательных систем. Технические требования к резонаторам, используемым в генераторных схемах и в селективных цепях (решающих устройствах, фильтрах) различны, хотя бы по величине рассеиваемой ими мощности. Поэтому кварцы, используемые в генераторах, теперь часто называют «кварцевыми осцилляторами», оставляя термин «резонатор» для кварцев селективных цепей. Так как «кварцевым осциллятором» называют также кварцевый генератор в целом, — мы сохраним прежнюю терминологию, но избежание путаницы. В тексте же, для сокращения письма, мы будем применять термин «кварц».

В последнее время появились теоретические работы [1], результаты которых позволяют думать, что расчет таких генераторов вскоре станет доступным для инженерной практики.

4. Расчет кварцев на заданные частоту и „активность“, а также конструирование рациональных кварцедержателей.

5. Контроль технологических операций в кварцевом производстве.

Вторая мировая война потребовала существенного повышения качества кварцев при одновременном резком увеличении объёма выпуска их. Новая и точная техника измерений вошла в кварцевое производство. Эти методы измерений основаны на косвенном и пока лишь относительном измерении характеристик электрического контура, эквивалентного кварцу [2], [3], [4].

6. Стандартизация кварцев.

Те же причины, что и только что указанные, вызвали к жизни вопрос о стандартизации кварцев [5]. Естественно, что научно-обоснованная стандартизация возможна лишь при характеристике кварцев точными значениями величин их эквивалентных параметров.

Ниже автор приводит некоторые результаты своей работы в указанном направлении.

При всех измерениях автор пользовался разработанным им осцилляторным методом. Этот метод очень прост, достаточно точен, не требует сложной аппаратуры для измерений и позволяет строить прямопоказывающие приборы, что в большой степени сокращает время, необходимое для измерений, обладает широким частотным диапазоном и позволяет получать результат без сложной обработки результатов наблюдений.

В итоге данной работы, нами приводятся расчетные формулы для сопротивления кварцев, именно тех типов, для которых не удавалось правильно его рассчитать при помощи общеизвестных формул.

1. КОМПОНЕНТЫ ЭКВИВАЛЕНТНОГО АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КВАРЦА

1. Уравнение колебаний упругого, вязкого стержня по Кади [6]

$$M\ddot{\xi} + N\dot{\xi} + G\xi = F, \quad (1)$$

где: ξ — деформация; M , N и G — эквивалентные масса, сопротивление и жёсткость материала; F — возбуждающая механическая сила, приложенная к концам стержня [7]. Эта сила распределена равномерно по торцевым граням стержня и потому вызывает одинаковые нормальные напряжения в любом сечении его, перпендикулярном к длине. Поскольку в кварце пьезоэлектрические силы также вызывают одинаковые нормальные напряжения в тех же сечениях, они могут быть заменены эквивалентной им силой F .

Если к тем же торцевым граням стержня приложены еще какие-то добавочные силы, в общем случае зависящие от ξ , ξ и ξ , то вместо (1) имеем

$$M\xi + N\xi + G\xi = F + \sum \Theta_k(\xi, \xi, \xi), \quad (2)$$

если в функции Θ_k переменные разделяются, то можно написать

$$M'\xi + N'\xi + G'\xi = F, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} M' &= M + \sum M_k; \\ N' &= N + \sum N_k; \\ G' &= G + \sum G_k. \end{aligned}$$

Чтобы найти эквивалентные электрические параметры кварца, нужно умножить M' , N' и G' на коэффициент β , зависящий от размера кварца и от его пьезоэлектрического модуля. Тогда имеем:

$$\left. \begin{aligned} L' &= \beta M + \sum \beta M_k = L_q + \sum L_{qk}; \\ \frac{1}{C'} &= \beta G + \sum \beta G_k = \frac{1}{C_q} + \sum \frac{1}{C_{qk}}; \\ R' &= \beta N + \sum \beta N_k = R_q + \sum R_{qk}; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

2. В тех случаях, когда дополнительные силы нельзя считать равномерно распределёнными по торцевым сечениям стержня, например, когда потери энергии вносятся трением в точках зажатия кварца в держатель, задачу можно решить лишь приближённо.

В кварце при колебаниях силы упругости и силы инерционные во много раз больше сил трения, даже в точках крепления его. Поэтому можно допустить, что силы трения не нарушают равномерного распределения консервативных сил в сечениях кварца, т. е. задача остаётся плоской, и, следовательно, можно производить пересчёт всех дополнительных сил применительно к нужному сечению, пользуясь энергетическими или иными соотношениями. Тогда формулы (4) могут быть применены и к таким случаям.

Вносимые компоненты L_{qk} и $\frac{1}{C_{qk}}$ во всех случаях имеют очень малую относительную величину (обстоятельство, косвенным образом подтверждающее допустимость предположения о неизменном распределении консервативных сил по сечению стержня). Однако при вычислении величины активного сопротивления кварца, вносимые

компоненты, как правило, значительно превосходят по величине собственную компоненту, обусловленную вязкостью кристалла и диэлектрическими потерями в нем. Поэтому общеизвестные расчётные формулы для R_q в большинстве случаев дают совершенно неправильный результат.

Аналитическое выражение для эквивалентного активного сопротивления кварца имеет вид

$$R_q = \frac{\pi^2 \rho B}{8e^2} \frac{\Delta}{s} \text{ (CGS)} = \frac{\pi^2 \rho B}{8e^2} \frac{\Delta}{s} \cdot 9 \cdot 10^{11} \Omega, \quad (5)$$

как для брусков, колеблющихся по длине [8], так и для пластинок, колеблющихся по толщине при колебаниях различных типов [9].

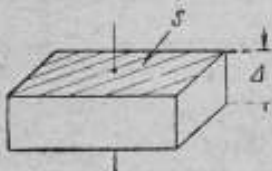


Рис. 1

В этом уравнении: ρ — плотность кристаллического кварца; e — пьезоэлектрический модуль; Δ — размер резонатора в направлении силовых линий внешнего поля (этот размер мы часто будем называть толщиной кварца); s — площадь его грани, перпендикулярной размеру Δ (см. рис. 1).

Что касается коэффициента B , то он вводится в дифференциальное уравнение (1) как вязкость кварца [6]. Бехманн [10] указывает, что коэффициент B также учитывает диэлектрические потери в кварце и считает его величину равной 0,25.

Однако экспериментально определенное значение коэффициента B для реального кварца оказывается часто во много раз большим, чем 0,25. Объясняется это тем, что потери энергии в колебательной системе кварцевого резонатора определяются не только вязкостью кристалла и диэлектрическими потерями в нем, но также и другими причинами. Поэтому Вигурё [7] и Бехманн [11] указывают, что этот коэффициент в реальном кварце заранее определить нельзя, а можно найти только экспериментальным путём.

Придание столь условного смысла коэффициенту B отнюдь не приближает нас к разрешению практической задачи о вычислении эквивалентного сопротивления кварца, и, кроме того, оно принципиально неправильно. Нельзя выразить сопротивление кварца формулой (5), какое бы значение коэффициенту B мы ни придавали, так как аналитические зависимости отдельных компонент сопротивления, в функции размеров кварца различны.

Формула (5) получена в предположении наличия лишь потерь на внутреннее трение в кристалле и может быть использована для вычисления только соответствующей компоненты сопротивления кварца.

Размерность произведения ρB в формуле (5)

$$[\rho B] = ML^{-1} T^{-1},$$

т. е. та же, что и размерность коэффициента внутреннего трения η в газах и жидкостях, где сила внутреннего трения

$$F_i = S\eta \frac{\partial v}{\partial n}, \quad (6)$$

здесь S — площадь трения и $\frac{\partial v}{\partial n}$ — градиент скорости (в направлении, нормальном к движению).

На рис. 2 показаны типичные деформации резонатора.

В табл. 1 приведены значения пьезоэлектрического модуля e^* для этих колебаний.

Таблица 1

Литературный источник	X-срез Y-срез (рис. 2а и 2б)	AT-срез (рис. 2в)	BT-срез (рис. 2г)	CT-срез (рис. 2д)	DT-срез (рис. 2е)
Бехмани [9] . .	$4,77 \cdot 10^4$	$2,62 \cdot 10^4$	$2,63 \cdot 10^4$	—	—
Мэзон [10] . .	$5,02 \cdot 10^4$	—	—	—	—
Шубников [11]	$4,93 \cdot 10^4$	—	—	—	—
Хайт и Виллард [12] . .	—	—	—	$3,0 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^4$

Примечания:

1. Значение e перпендикулярных срезов Бехмани дает при рассмотрении колебаний пластинок (рис. 2б), Мэзон — брусков Y-среза (рис. 2а).

2. Значения e даны в абсолютных единицах. Между прочим, сравнивая приведенные данные модуля наиболее исследованных перпендикулярных срезов, мы можем заключить, что ошибка от неточного знания этой величины, при пользовании формулой (5), может достигать 10%.

3. По характеру распределения, мы имеем в кварце следующие виды потерь:

1) объёмные потери, обусловленные внутренним трением (вязкостью), диэлектрическими потерями, сопротивлением, вносимым связанными колебаниями в кварце;

2) поверхностные потери, обусловленные внутренним трением в поверхностном слое кварца и в металлических покрытиях, а также ультразвуковым излучением;

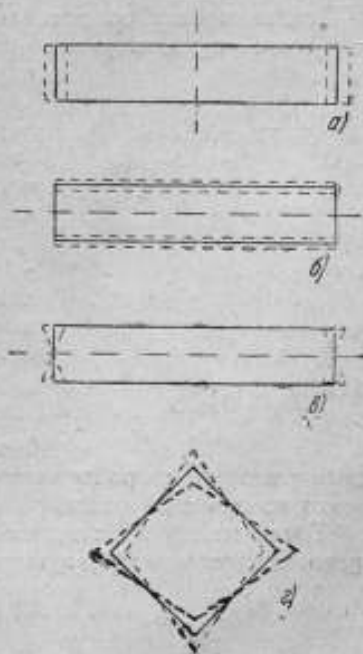


Рис. 2

3) местные потери, обусловленные трением в местах крепления кварца, а также в местах различных дефектов кристалла (трещинки, включения и т. д.).

Каждый из этих видов потерь, как увидим ниже, выражается своей формулой, в которую входят коэффициенты потерь, физические константы кварца и его геометрические размеры. Мы можем насчитать семь отдельных компонент, для которых в дальнейшем примем следующие обозначения:

Причина, вызывающая появление компонент	Обозначение компонент	Объяснение индекса
1. Трение в местах крепления	R_{qf}	Friction
2. Излучение ультразвуковых волн	R_{qr}	Radiation
3. Связанные колебания в резонаторе	R_{qi}	Insert
4. Трение в дефектных местах кристалла	R_{qd}	Defect
5. Трение в поверхностном слое кварца	R_{qs}	Skin
6. Трение в металлических покрытиях	R_{qm}	Metal
7. Вязкость и диэлектрические потери	R_{q0}	—

Для оценки относительной величины отдельных компонент сопротивления мы условимся относить их к компоненте R_{q0} , которая выражается формулой (5).

2. О МЕТОДИКЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Все измерения сопротивления кварца производились разработанным нами осцилляторным методом.*

Мы даем здесь его краткое описание.

1. Предполагается, что эквивалентная электрическая схема кварца имеет общеизвестную форму простого колебательного контура, параметры которого должны содержать все вносимые компоненты (рис. 3).

В схеме кварцевого генератора, при автоколебаниях, этот контур мы можем заменить последовательным соединением активного сопротивления R'_q и реактивного (индуктивного) x'_q , называемых нами „действующими“. В схеме измерительного генератора сопротивление его цепей,

измеренное со стороны зажимов кварца, представляется емкостью C , легко измеряемой обычными методами.

Тогда между действительными параметрами кварца и действующими существуют следующие соотношения:

$$\begin{aligned} R'_q &= k_s^2 R_q; \\ x'_q &= k_s x_q, \end{aligned} \quad (7)$$

* Авторское свидетельство № 68559, Ж. Т. Ф., XVII, 3, 349

где

$$x_g = \omega L_g - \frac{1}{\omega C_g}.$$

„Коэффициент расстройки“ k_s выражается следующей формулой:

$$k_s = 1 - \frac{C_0}{C}. \quad (8)$$

2. Схема измерительного генератора показана на рис. 4.

Генератор работает без тока сетки и при больших значениях сопротивлений R_a и R_g , благодаря чему потери энергии в электрической системе его на 95—99% определяются потерями энергии в кварце.

Условия стационарности колебаний, при условии

$$R_g \gg \frac{1}{\omega C_g} = |x_g|; \quad R_a \gg \frac{1}{\omega C_a} = |x_a|$$

и при малых амплитудах, будут

$$\begin{aligned} R_g' - Sx_a x_g + \frac{x_a^2}{R_a} + \frac{x_g^2}{R_g} &= 0; \\ x_g' + x_a + x_g &= 0, \end{aligned}$$

где S — крутизна характеристики лампы.

Ввиду возможности применения очень больших R_g , для измерения сопротивления можно пользоваться уравнением

$$R_g' = Sx_a x_g - \frac{x_a^2}{R_a}. \quad (9)$$

Если путём изменения величины емкости C_g (при $C_a = \text{const}$) поддерживать напряжение на сетке лампы равным одной и той же постоянной величине, например, 1 В, то $S = \text{const}$, и тогда R_g' является линейной функцией x_g .

Специальными измерениями было установлено, что включение последовательно с кварцем безреактивного сопротивления R эквивалентно увеличению R_g' на величину включенного сопротивления. Отсюда вытекает метод измерения R_g' , а, следовательно, и определения значения R_g при помощи уравнений (7) и (8).

Включением известных сопротивлений R изменяют значение x_g , необходимое для поддержания $U_g = 1$ В, и строят график $x_g = f(R)$. Такой график показан на рис. 5. Экстраполируя полученную прямую

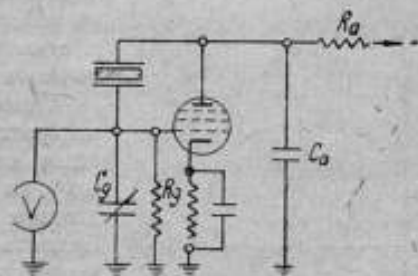


Рис. 4

к' $x_g' = 0$, находим на оси ординат отрезок OA , который, в масштабе сопротивлений, даёт значение суммы

$$R_g' + \frac{x_g^2}{R_a}$$

При применении ламп с большой крутизной (1851, 6Ж2М) слабое $\frac{x_g^2}{R_a}$ весьма мало и им часто можно пренебречь, в особенности при работе с кварцами — пластинками на высокие частоты.

Однако, при точных измерениях, поправка на потери энергии в R_a легко может быть рассчитана, так как x_g и R_a могут быть точно измерены.



Рис. 5

Описанный метод вариации активного параметра может быть использован лишь один раз для определения наклона прямой на графике (рис. 5). Этот наклон должен быть исправлен на собственную ёмкость кварца, применённого при получении графика, и тогда получается градуировка прибора, имея которую, находят R_g' любого измеряемого кварца той же частоты, прямо по отсчету на лимбе конденсатора C_g . Для расширения диапазона измеряемых величин R_g применяется включение различных по величине постоянных конденсаторов C_a . При работе

на иной частоте, чем та, при которой была произведена градуировка, можно просто изменить наклон градуировочных прямых обратно пропорционально квадрату частоты (см. уравнение (9)).

В нашем методе можно также измерять R_g путём изменения S , при $x_a = \text{const}$ и $x_g = \text{const}$. Это позволяет строить прямопоказывающие приборы для измерения R_g .

Если измерять также напряжение на анодном конденсаторе (C_a), то отпадает необходимость в градуировке, и сопротивление R_g может быть вычислено по формуле

$$R_g' = x_g \frac{U_a}{U_g} \sqrt{1 - \left(\frac{U_g C_g}{U_a C_a} \right)^2},$$

а при $U_g = 1$ получается выражение

$$R_g' = K U_a,$$

где K — коэффициент пропорциональности.

3. Для приведённых ниже измерений был использован первый из трёх описанных вариантов. В тех случаях, когда требовалось

определить какое-либо приращение сопротивления, применялся часто метод замещения, т. е. компенсация приращения R_g' равным ему и обратным по знаку приращения добавочного сопротивления R . При этом применялись как магазин безреактивных сопротивлений, так и углеродные сопротивления.

Измерительные приборы по нашему методу были оформлены в виде технически законченных конструкций.

Для контроля постоянства напряжения на сетке был применен компенсационный метод; для регистрации компенсации—нулевой, чувствительный гальванометр. В результате, работа на таком приборе была технически вполне аналогична работе на мостовой схеме.

3. СОПРОТИВЛЕНИЕ, ВНОСИМОЕ МЕХАНИЧЕСКИМ КОНТАКТОМ КОЛЕБАЮЩЕГОСЯ КВАРЦА С ЖЕСТКОЙ ОПОРОЙ

1. Сопротивление, обусловленное потерями на трение в местах механического контакта колеблющегося кварца с жесткой опорой, имеет место во всех без исключения кварцедержателях, и из опыта известно, насколько оно может быть неустойчивым и сколь большие значения может принимать. „Невозможно было бы привести все значения декремента, когда резонатор имеет контакт с жестким металлическим электродом, исключая случаи, когда он был сильно зажат и его декремент очень велик“—говорит Ван Дайк [13]. Действительно, крепление кварцев в держателях требует особого внимания; часто малейшая неправильность ведёт к совершенно недопустимым значениям декремента, причем в особенности у кварцев, частота колебаний которых определяется большим размером. Эта чувствительность кварца к трению в местах механических контактов создает кажущуюся неопределенность или чрезвычайную сложность тех законов, которым подчинены здесь силы трения.

Не отрицая сложности всей проблемы механического крепления кварца, мы покажем, что силы трения в местах контакта имеют вполне определенные закономерности, и если сейчас мы еще не можем подойти к расчету вносимого контактом сопротивления, то только по причине недостаточного внимания, уделявшегося до сих пор как изучению этого вопроса, так и конструкции кварцедержателей.

В настоящее время не существует полной теории трения двух несмазанных поверхностей. Если говорить о работе механизмов, то можно лишь утверждать, что процессы, имеющие место при таком трении, весьма сложны и что упругость, вязкость и твердость материалов трущихся поверхностей должны играть здесь весьма существенную роль [14]. Но почти все технические случаи трения касаются работы механизмов при больших взаимных смещениях поверхностей; для колебаний же кварца характерны весьма малые (10^{-7} см) смещения в местах механического крепления его.

Имеющиеся в литературе весьма немногочисленные работы, посвященные вопросу трения при малых смещениях, позволяют

утверждать, что характер сил трения (взаимодействия) здесь существенно отличен от установившихся представлений о силах трения в технике.

Так, Ранкин [15] нашёл, что силы взаимодействия при малых смещениях (до $8 \cdot 10^{-6}$ см) имеют упругий характер, причём „модуль упругости“ взаимодействия пропорционален силе нажатия, а предел упругости, при разных нагрузках, наступает примерно при одних и тех же смещениях.

Томансон [16] в своей работе „Молекулярная теория трения“ говорит, что при смещениях, величина которых меньше междоатомных расстояний ($2 \div 4 \cdot 10^{-8}$ см), можно ожидать полного исчезновения неупругого трения. Этот вывод он пытается подтвердить опытами с качанием маятника и действительно получает уменьшение коэффициента трения при очень малых амплитудах.

В 1939 г. С. Хайкиным и др. [17] были подтверждены выводы Ранкина о наличии упругой компоненты сил воздействия, во время опытов с измерением затухания кварца при механическом контакте его поверхности со специальной металлической накладкой. Кроме того, С. Хайкин нашёл, что характер и величина сил взаимодействия не изменяются в зависимости от того, являются ли смещения нормальными или тангенциальными. Отсюда он делает вывод, что поле сил взаимодействия при малых смещениях имеет приблизительно шаровую форму.

Из сказанного следует, что законы трения при малых смещениях иные, чем в обычных технических случаях, и изучение их не только поможет решить поставленную задачу о сопротивлении, вносимом креплением в эквивалентную схему кварца, но и приблизит нас к выяснению физических закономерностей для сил взаимодействия между двумя твёрдыми телами при их тесном контакте.

2. В 1941—1942 гг. автором настоящей работы были поставлены опыты, имевшие целью изучение той компоненты эквивалентного сопротивления кварца, которая вносится его креплением и которую мы обозначаем через R_{gf} .

Применение для измерения R_{gf} осцилляторного метода позволило одновременно измерить также мнимую компоненту коэффициента трения путём измерения изменений частоты колебаний. Кроме того, этот метод даёт возможность иметь данные для расчёта величины смещений точек поверхности кварца.

Для измерений было применено специальное зажимающее устройство. Кварц зажимался между двумя зажимающими упорами и сила зажатия могла быть установлена по желанию (путем нагрузки гириями). Следует отметить, что как конструкция зажимающего устройства, так и сами измерения потребовали большого внимания, так как малейшие перекосы в зажимающих упорах, ведущие к перераспределению усилий по контактирующей поверхности, неизбежно вели к большим ошибкам, так как вызывали незакономерные изменения сопротивления кварца.

В наших измерениях мы применяли кварцы типа изображённых на рис. 2а и г. Поверхность кварцев и упоров была шлифованной;

для шлифования применялся очень мелкий наждак, который используется в производстве кварцев при окончательном шлифовании их. Электроды были нанесены на поверхность химическим путём в виде тонкого слоя серебра. Зажимающие упоры одновременно служили электрическими контактами. Материал упоров — мягкая сталь (серебрянка).

3. Прежде чем перейти к обсуждению полученных результатов, определим величины смещений, имевших место при измерениях в месте зажатия для случая кварца типа, изображённого на рис. 2г.

Упростим задачу, предположив деформацию пластинки такой, какая показана на рис. 6. Пользуясь известными соотношениями [7] для пьезоэлектрических эффектов, можем написать

$$\left. \begin{aligned} \Delta_m I &= \frac{F s'_{55}}{2 \Delta} + d'_{25} \frac{l}{\Delta} V; \\ q &= C_0 V - F \frac{l}{2 \Delta} d'_{25}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Выражения (10) составлены в предположении, что возбуждающие электроды нанесены в виде слоя металла на поверхность больших граней пластинки. В этих уравнениях: d'_{25} — пьезоэлектрическая постоянная сдвига; s'_{55} — модуль; C_0 — диэлектрическая ёмкость пластинки; V и q — напряжение и заряд на больших гранях её.

Из уравнений (10), исключая силу F , получаем

$$\Delta_m I = \frac{(C_0 V - q) s'_{55}}{l d'_{25}} + d'_{25} \frac{l}{\Delta} V. \quad (11)$$

При осцилляторном методе измерения, эквивалентных параметров, в цепи, состоящей из кварца и последовательно соединённых ёмкостей C_n и C_g (см. рис. 4), имеют место автономные колебания, поэтому заряд q на обкладках кварца равен

$$q = \frac{C_n C_g}{C_n + C_g} V = CV. \quad (12)$$

Подставив уравнение (12) в выражение (11) и обозначив $d'_{25} s'_{55} = e_{\text{ст}}$ (пьезоэлектрический модуль), получаем

$$\Delta_m I = \frac{C_0 - C}{l e_{\text{ст}}} V + d'_{25} \frac{l}{\Delta} V \approx \frac{C}{l e_{\text{ст}}} V. \quad (13)$$

Последнее упрощение допустимо потому, что d'_{25} имеет порядок 10^{-8} , а $e_{\text{ст}}$ — порядок 10^8 ; кроме того, C_0 составляет не более $10^{0/10}$ от C , следовательно формула (13) даёт возможность вычислить порядок величины смещения.

В наших опытах было:

$$V_{\max} \approx 1 \text{ В};$$

$$C = 250 \text{ см};$$

$$l = 3 \text{ см}.$$

Пьезоэлектрический модуль для среза СТ

$$e_{\text{ст}} = 3,0 \cdot 10^4 \text{ (CGS)}.$$

Подставив эти данные в уравнение (13), получаем

$$\Delta_m l \approx 0,9 \cdot 10^{-5} \text{ см}.$$

Вдоль грани, перпендикулярной узловой линии OO (рис. 6), смещения Δl распределены по синусоиде с амплитудой $\Delta_m l$. Вблизи узловой линии на расстоянии r_0 , если $r_0 \ll l$, они будут

$$\Delta l = \pi r_0 \frac{\Delta_m l}{l}.$$

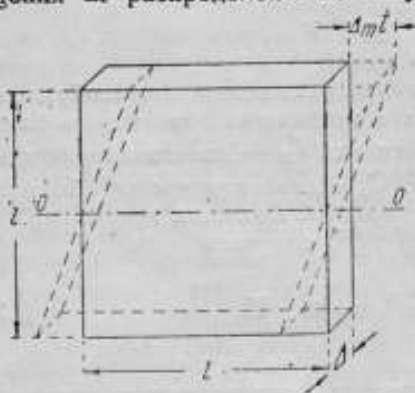


Рис. 6

Упоры, применявшиеся нами, имели форму усеченных конусов с диаметром малых оснований 1,0 и 0,1 мм.

Поэтому на периферии контактной площади смещения были

$$(\Delta l)_{1,0} = 4,7 \cdot 10^{-7} \text{ см};$$

$$(\Delta l)_{0,1} = 4,7 \cdot 10^{-8} \text{ см}.$$

Таким образом, при малых упорах смещения в пределах контакта были порядка межуатомных расстояний и меньше их, при больших упорах — на один порядок выше.

4. Обратимся теперь к кривым (рис. 7), полученным при упорах малого диаметра. По оси абсцисс отложены зажимающие давления P в килограммах, по оси ординат — сопротивление кварца — R' , и изменения частоты Δ_f .

Из кривых мы видим, что процесс изменений сопротивления и частоты может быть разбит на три характерных участка: 1) участок A (до $P=0,75 \text{ кг}$), в пределах которого частота растёт линейно, а сопротивление, возрастая, достигает максимума; 2) участок B , (до $P=1,5 \text{ кг}$), в пределах которого приращения частоты с нагрузкой уменьшаются и становятся равными нулю на границе с участком C , а приращения сопротивления становятся отрицательными, также уменьшаются по абсолютной величине и, наконец, обращаются

в нуль; 3) участок *C*, в пределах которого как частота, так и сопротивление остаются неизменными по величине независимо от нагрузки.

Кривые подобного типа получены были неоднократно, причём с уменьшением диаметра упоров приращение частоты и приращение сопротивления также уменьшаются. При упорах, сделанных из грамофонных игл, при правильно выбранной точке зажатия изменений обеих величин обнаружить не удалось. На такое отсутствие зависимости сопротивления кварца от давления при игловидных упорах указывает также Мэзон [10].

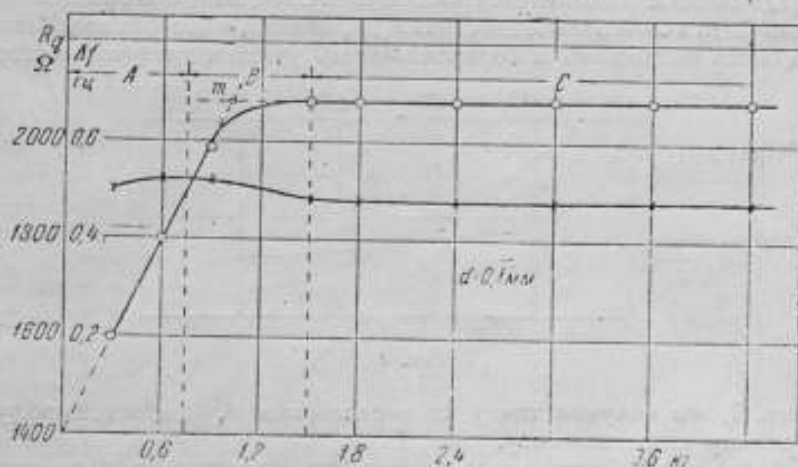


Рис. 7

Нам кажется, что полученные зависимости могут быть объяснены следующим образом.

Поверхности кварца и упора имеют шероховатости размером порядка микрона и выше, а потому первоначально касание поверхностей имеет место лишь в отдельных точках. В этих точках материал оказывается перегруженным, что в особенности легко получается ввиду того, что шлифованная поверхность кварца имеет очень острые гребешки, образующиеся в процессе шлифования выкалыванием осколков кварца абразивом.

Ввиду шаровой формы поля сил взаимодействия при малых смещениях, эти силы будут пропорциональны эффективной площади соприкосновения трущихся поверхностей.

Если через σ_c обозначить предел текучести материала (в данном случае — стали, так как твердость кварца значительно выше), то площадь соприкосновения определится величиной нагрузки и может быть найдена из выражения

$$S_c = \frac{P}{\sigma_T} \quad (14)$$

Если обозначить модуль упругости взаимодействия через E_i , то сила упругого взаимодействия будет

$$F_z = E_i \xi S_0 = \frac{E_i \xi}{\sigma_T} P. \quad (15)$$

Эта сила пропорциональна нагрузке, чему соответствует линейное изменение частоты на участке A процесса.

С ростом нагрузки, эффективная площадь должна расти вплоть до того момента, пока все углубления на поверхности кварца не будут заполнены более мягкой сталью. Начиная с этого момента, площадь S_0 должна оставаться постоянной. Следовательно, постоянная должна быть и сила взаимодействия F_z , а, значит, и частота колебаний. Продолжив наклонный и горизонтальный участки графика частоты

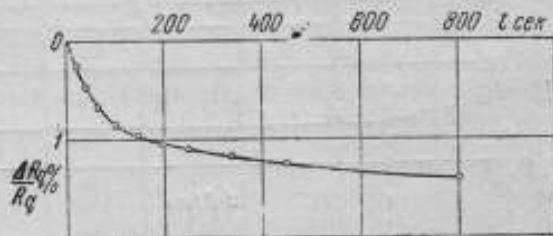


Рис. 8

на рис. 7, мы получим точку их пересечения m , соответствующую указанному выше моменту.

Однако такого идеального протекания процесса не происходит и это может быть объяснено тем, что: 1) в процессе течения материала происходит его упрочнение (наклёп), в результате чего площадь соприкосновения растёт медленнее, чем сжимающая сила; 2) сила упругого взаимодействия F_z сильно возрастает и оказывается приложенной почти ко всей поверхности упора, что приводит к общей деформации его (переход от местных деформаций и точечных возбудителей упругих волн к общей деформации поверхности и к появлению плоской волны). В результате, величина взаимных смещений между поверхностями уменьшается, а, следовательно, уменьшаются по величине и упругие силы связи.

Этими процессами характеризуется участок B , причём переход от участка A к участку B происходит при удельном давлении 8750 кг/см^2 , что примерно равно пределу текучести стали.

Наличие пластических деформаций на участках A и B подтверждается зависимостью сопротивления кварца от времени приложения силы. Типичная зависимость такого рода показана на рис. 8. Явление это наблюдается всегда, когда кварц зажат между игольчатыми упорами и в особенности заметно при слабых зажатиях. По ординатам на рис. 8 отложены изменения сопротивления в процентах от полного сопротивления кварца при работе его в вакууме (30 мм рт. ст.). Ввиду того, что сопротивление, вносимое трением

при игольчатых упорах, очень мало, — очевидно, его временные изменения будут выражаться десятками процентов.

На участке *C* процесса частота остаётся неизменной. Это свидетельствует о том, что упругие силы связи кварца с упором также остаются неизменными. Последнее может быть объяснено, если предположить, что эти силы теперь определяются упругостью

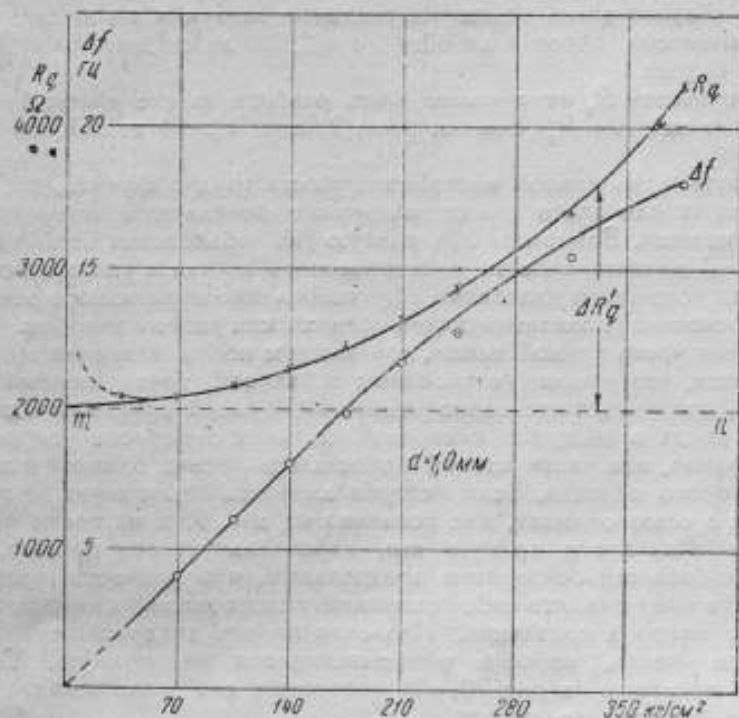


Рис. 9

самого упора, т. е. взаимных смещений между кварцем и упором не существует. Тогда происходящее с увеличением P расплющивание конца упора (вследствие текучести материала) не может привести к появлению добавочных упругих сил.

В этой стадии процесса имеет место как бы „сращение“ упора с кварцем.

Кривая сопротивления на рис. 7 подтверждает сказанное выше. Так, на участке *A* сопротивление растёт в силу роста эффективной площадки соприкосновения. Перестает расти сопротивление при переходе от *A* к *B*, это свидетельствует об уменьшении взаимных смещений между кварцем и упором. Далее, на протяжении участка *B*, оно падает и в пределах участка *C* остаётся неизменным. Повидимому, здесь потери энергии определяются только вязкостью

материала упора, в то время как на участках *A* и *B* они обуславливались также трением между материалами при их взаимных смещениях. Быть может, уменьшение сопротивления со временем (рис. 8) можно объяснить процессом „сращивания“.

5. Рассмотрим теперь случай большей площади контактирующей поверхности ($d=1$ мм), на периферии которой смещения достигают $5 \cdot 10^{-3}$ см. На рис. 9 приведены зависимости для этого случая. По оси абсцисс здесь отложены удельные давления σ в кг/см^2 .

Зависимость Δf от σ линейна до $\sigma \approx 200 \text{ кг/см}^2$, затем крутизна кривой падает.

Зависимость R_q от σ может быть разбита на две части: 1) для $\sigma < 70 \text{ кг/см}^2$, где R_q уменьшается; 2) для $\sigma > 70 \text{ кг/см}^2$, где она растёт.

Первую часть кривой экспериментально трудно изучить, так как при нужных для этого малых нагрузках результаты получаются неустойчивыми. Возможны два следующих объяснения этой части кривой: а) влияние плохого электрического контакта упора с металлическим покрытием пластинки; б) установление нормального режима соприкосновения контактирующей поверхности упора с кварцем.

Вторая часть кривой также, при каждом новом измерении (предполагается, что упоры установлены в узловой точке каждый раз заново), получается несколько различной по своей крутизне. Однако всегда, когда в процессе измерений никаких перекосов упоров не происходило, эта часть кривой оказывалась весьма близкой к параболе второго порядка. Если экстраполировать эту кривую до пересечения с осью ординат, как показано на рис. 9, и из точки пересечения m провести прямую ml , параллельную оси абсцисс, то можно с большим основанием предполагать, что разности ординат ΔR_q будут представлять собой компоненту сопротивления кварца, вносимую трением в крепление. Извлекая корень квадратный из ΔR_q , получаем числа, хорошо укладывающиеся на прямую. Такие прямые показаны на рис. 10; они построены для различных случаев зажатия, при тех же упорах.

Представляет интерес сравнить между собою по величине компоненты сил взаимодействия. Это можно сделать, пересчитав наблюдаемые изменения частоты на эквивалентное изменение ёмкостного реактивного сопротивления динамической ветви контура, эквивалентного кварцу. Последовательно с эквивалентной ёмкостью теперь будет включен конденсатор, реактивное сопротивление которого можно найти из формулы

$$\Delta x_q = x_{ef} = 2\omega L_q \frac{\Delta f}{f}.$$

Так как в нашем случае

$$L_q \approx 100 \text{ H}, \quad f = 1 \cdot 10^5 \text{ цз},$$

то

$$\Delta x_q \approx 12 \cdot 10^2 \Delta f \Omega.$$

Зависимость $\frac{\Delta R_q}{\Delta x_q}$ от P , в свете сказанного выше, должна быть линейной, причём наибольшее значение $\frac{\Delta R_q}{\Delta x_q}$, получающееся здесь, равно $\sim 0,1$. Отсюда следует, что при малых удельных давлениях упругая компонента сил взаимодействия во много раз превосходит по величине неупругую.

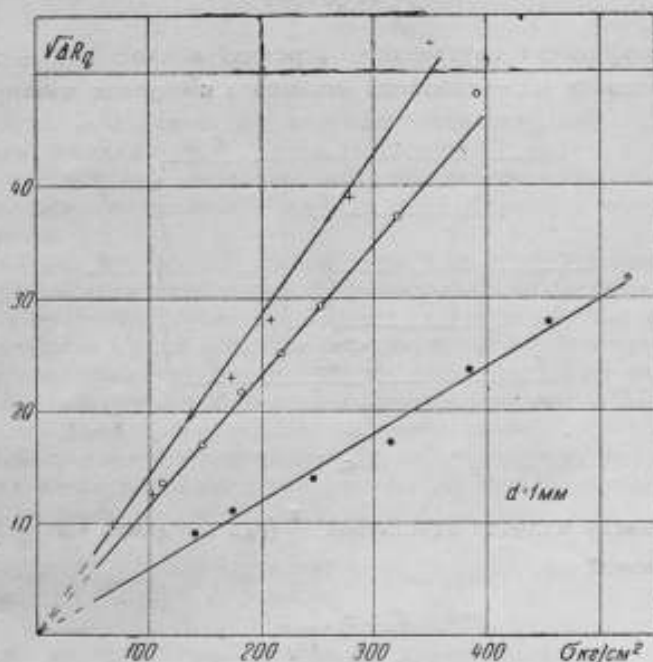


Рис. 10

6. Для решения практических задач, связанных с креплением кварца, крайне важно знать зависимость вносимого креплением сопротивления от размеров контактной поверхности и кварца. Найти эту зависимость экспериментально путём замены одних упоров другими (с иной площадью) оказалось очень трудной задачей. Это нужно объяснить невозможностью получения одинаковой обработки поверхности упоров и, главное, одинакового распределения усилий по контактирующей поверхности. Поэтому был применён иной метод, заключавшийся в измерении сопротивления кварца при смещении точки зажатия в сторону от узловой линии колебаний. Результаты таких измерений хорошо объясняются, если предположить, что процесс рассеяния энергии происходит в некотором промежуточном слое между трущимися поверхностями, в котором силы трения пропорциональны скорости деформации.

Толщину этого промежуточного слоя мы обозначим через δ . Для простоты рассмотрения возьмём случай кварца-бруска (типа рис. 2а) с узловой плоскостью, проходящей через его середину, перпендикулярно длине. Пусть контактная поверхность упора имеет форму прямоугольника с размерами a и b (см. рис. 11). Для неупругой компоненты силы взаимодействия примем выражение:

$$F_r = \eta S \frac{\xi}{\delta},$$

где η — коэффициент внутреннего „трения“ в слое δ , S — площадь соприкосновения и ξ — скорость взаимного смещения поверхностей,

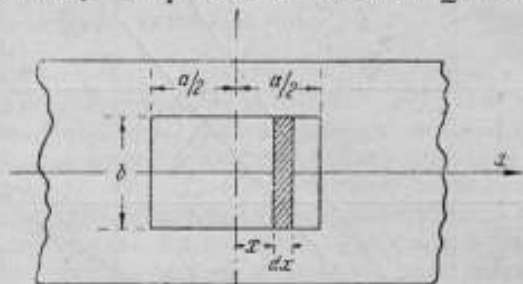


Рис. 11

которую, ввиду малости отношения $\frac{x}{l}$ (где l — длина кварца), можно считать равной

$$\xi = \xi_0 \frac{\pi}{l} x,$$

где ξ_0 — скорость точек концевго сечения кварца.

Тогда на площадке $b dx$

$$dF_r = \eta \xi_0 \frac{\pi}{l \delta} b x dx.$$

Интегрируя от $x=0$ до $x = \frac{a}{2}$, получаем для всей площади двух упоров

$$F_r = \eta \xi_0 \frac{\pi}{l \delta} b a^2. \quad (16)$$

Эта формула выражает неупругую компоненту сил взаимодействия в функции ξ_0 и для расчёта R_{qf} мы воспользуемся уравнением (2) Для бруска кварца

$$\beta = \frac{1}{4e^2} \frac{1}{l_0^2}. \quad (17)$$

Поэтому из формулы (4), используя уравнения (16) и (17), получаем (полагая в выражении (16) $l = l_m$)

$$R_{qf} = \frac{\pi \cdot \eta}{4e^2 \delta} \frac{ba^2}{l_m l_0^2}. \quad (18)$$

Относительную величину R_{qf} получим, используя уравнение (5):

$$\frac{R_{qf}}{R_{q0}} = 2 \frac{\eta}{\pi \rho B^2} \frac{ba^2}{l_0 \Delta}. \quad (19)$$

Из формулы (19) видно, что относительная величина R_{qf} обратно пропорциональна площади узлового сечения кварца $l_0 \Delta$. Действительно, из практики известно, что пластинки, колеблющиеся по толщине, меньше „боятся“ зажатия, чем бруски с продольными колебаниями.

Нами было измерено R_{qf} при одинаковых условиях зажатия для двух брусков, отличавшихся по толщине вдвое; измерения показали, что R_{qf} у толстого бруска примерно вдвое меньше, чем у тонкого.

Возвращаясь к роли площади зажатия, мы видим, что существенна не только площадь контактирующей поверхности, но также и её форма; R_{qf} зависит линейно от b и пропорционально a^2 . Последняя зависимость была проверена экспериментально.

При квадратичной зависимости R_{qf} от a , смещение упора с узловой линии на Δa приведёт к увеличению R_{qf} на ΔR_q , которое будет пропорционально

$$\left(\frac{a}{2} + \Delta a\right)^2 + \left(\frac{a}{2} - \Delta a\right)^2 - a^2 = (\Delta a)^2.$$

При измерениях точка зажатия кварца смещалась в обе стороны от узловой линии, каждый раз на 0,25 мм; размер упора $a = 1$ мм. Приращение ΔR_q вычислялось как среднее арифметическое для двух симметричных точек смещения.

На рис. 12 показана полученная зависимость, причем по ординатам отложены значения $\sqrt{\Delta R_q}$. Как видим, результат достаточно хорошо подтверждает расчеты и, следовательно, правильность предположения о пропорциональности силы трения скорости деформаций.

7. Из пп. 5 и 6 следует, что при удельных давлениях, меньших 200 кг/см^2 , упругая компонента сил взаимодействия является линейной функцией давления на упор, а неупругая квадратичной, и, кроме того, она пропорциональна скорости взаимных смещений поверхностей. Принимая во внимание, что, по данным Ранкина [15], предел упругости взаимодействия наступает лишь при смещениях порядка $8 \cdot 10^{-8} \text{ см}$, приходим к выводу, что потери энергии здесь не могут быть объяснены процессами, имеющими место при трении скольжения. „Трущиеся“ поверхности в нашем случае весьма сильно

связаны упругими силами взаимодействия, и их взаимные смещения могут вызвать лишь упругие деформации.

Возможным объяснением рассеяния энергии здесь может явиться предположение об излучении упругих волн от контактирующей поверхности в твёрдое вещество, где и происходит их постепенное поглощение. Такое предположение подтверждается фактом использования „резонирующих“ упоров в кварцедержателях, когда выбором длины упора уменьшают потери энергии в местах крепления.

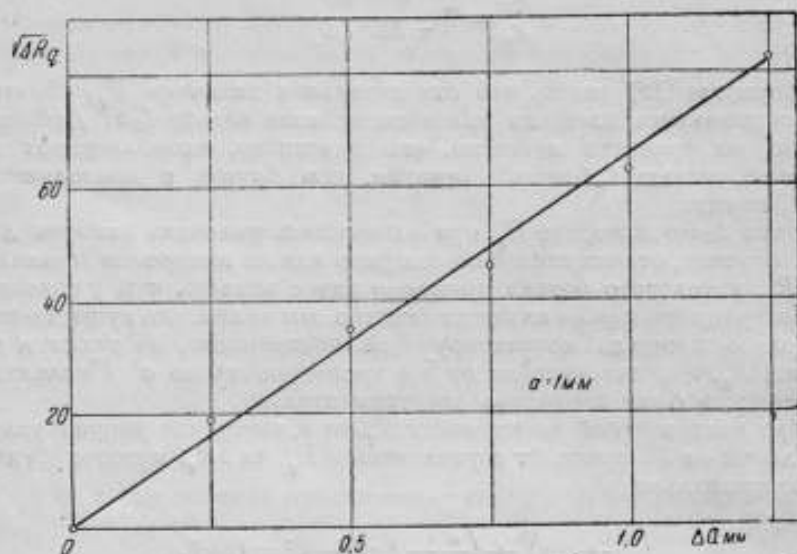


Рис. 12

Установленные закономерности для сил взаимодействия, перечисленные в начале параграфа 7, хорошо объясняются, если стать на эту точку зрения и предположить, что эффективная площадь соприкосновения пропорциональна силе нажатия.

Тогда, рассматривая точки соприкосновения, как излучатели упругих волн, имеющие размеры малые рядом с длиной упругой волны в твёрдом веществе поверхностей, — для активной компоненты сопротивления излучения (22) получим

$$r = \rho c S^2 k^2,$$

где ρ — плотность вещества, c — скорость звука в нём, S — площадь поверхности излучателя и k^2 — коэффициент пропорциональности.

Следовательно, неупругая компонента сил взаимодействия оказывается квадратичной функцией давления на упор и, очевидно, пропорциональной скорости смещений, независимо от их направлений.

Очевидно также, что упругая компонента этих сил будет прямо пропорциональна давлению.

При этом понятно, что размерность отношения введённых нами величин η и δ получается равной

$$\left[\frac{\eta}{\delta}\right] = [R_{yf} \cdot e^2] = M \cdot L^{-2} \cdot T^{-1},$$

т. е. размерности сопротивления излучения.

8. Формулы для R_{yf} могут быть получены таким же путём и для иных видов колебаний кварца.

Так, если принять для кварца типа рис. 21 полярную диаграмму смещений поверхности кварца, по отношению к узловой точке его колебаний, в форме круга (что для наших целей вполне допустимо), то, при центральном расположении круглого упора диаметром d , легко получить для неупругой компоненты силы выражение

$$F_r = \frac{1}{3} \eta \frac{\pi^2}{l\delta} d^3 \xi_0, \quad (20)$$

где l — длина большого ребра квадратной пластинки. Для вносимого сопротивления

$$R_{yf} = \frac{\pi \eta}{12e^2 \delta} \frac{d^3}{l^3} \cdot 9 \cdot 10^{11} \Omega. \quad (21)$$

Точно так же, выражая упругую компоненту

$$F_z = G_s S \frac{\xi}{\delta}, \quad (22)$$

где G_s — модуль сдвига в промежуточном слое, а ξ — смещения точек поверхности, можем получить для тех же условий

$$F_z = \frac{1}{3} G_s \frac{\pi^2}{l\delta} d^3 \xi_0 \quad (23)$$

и эквивалентную емкость

$$C_f = \frac{12e^2 l^3 \delta}{G_s \pi^2 d^3 0,9} \mu\mu F. \quad (24)$$

Однако формулы (21) и (24) не могут быть использованы непосредственно для расчётов, так как они не отражают зависимости R_{yf} и C_f от силы зажатия.

Из наших опытных данных, при помощи уравнения (21) для R_{yf} может быть составлена полуэмпирическая формула

$$R_{yf} = (300 \div 500) \frac{d^3}{l^3} \sigma^2. \quad (25)$$

Для отклонения частоты, используя формулу эквивалентной емкости кварца рассматриваемого типа

$$C_f = \frac{8e^2}{\pi^2 E} \frac{l^3}{\Delta},$$

где E — модуль Юнга кварца и соотношение

$$C_f = \frac{1}{2} C_s \frac{f}{\Delta f},$$

из выражения (24) также получаем полуэмпирическую формулу

$$\frac{\Delta f}{f} = (2,5 \div 4,5) \frac{d^3}{\Delta \cdot l} \sigma \cdot 10^{-4}. \quad (26)$$

В формулах (25) и (26) σ выражено в килограммах на квадратный сантиметр, а линейные размеры — в сантиметрах.

9. При выводе формул (18), (20) и (26) мы предполагаем равномерное распределение зажимающих усилий по всей контактирующей поверхности упоров (см. рис. 13а). При перекосах упоров распределение может оказаться неравномерным (например рис. 13б).

Введённые нами величины коэффициента внутреннего трения η и модуля сдвига G , для промежуточного слоя, в свете приведённого экспериментального материала, являются функциями усилий нажатия. Поэтому, в случае перекосов, они будут функциями распределения усилий по контактирующей поверхности.

При линейном распределении усилий (рис. 13б)

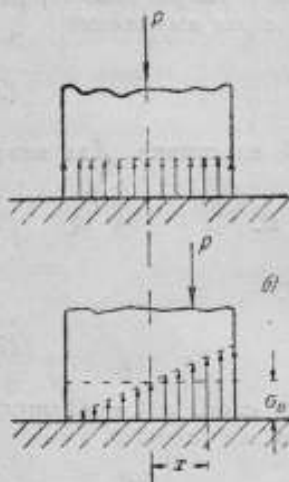


Рис. 13

$$\sigma_x = \sigma_0(1 + kx)$$

и тогда

$$G_{ix} = G_{i0} \sigma_0(1 + kx);$$

$$\eta_x = \eta_0 \sigma_0^3(1 + kx)^3.$$

Легко показать, что при этих условиях, после интегрирования выражение (23) для упругой силы остаётся прежним. Однако неупругая сила приобретает дополнительное слагаемое, пропорциональное (при прямоугольных упорах, рис. 11) $\frac{1}{8} k^2 a^4$, величина которого, при $k = \frac{a}{2}$ оказывается равной 25% от основного слагаемого. Следовательно, вносимое при этом сопротивление также возрастает на 25%. В промышленных конструкциях такое распределение усилий может получаться весьма легко, вследствие перекосов или в результате недостатков конструкции держателя и неудовлетворительного механического выполнения его.

10. Из формулы (26) следует, что для одного и того же кварца при разных диаметрах упоров

$$\frac{\Delta f}{\sigma d^2} = A = \text{const.}$$

На основании рис. 7 для $d = 0,1$ мм, находим

$$A_{0,1} = 0,057.$$

На основании рис. 9 для $d = 1$ мм получаем

$$A_{1,0} = 0,057.$$

Это хорошее совпадение, а также приведенные выше закономерности далеко еще не означают, что полученные формулы являются столь же точными на практике. Как уже было указано ранее, механические недостатки кварцедержателя (недостаточная жесткость системы, неплоская контактная поверхность упора, неравномерное распределение на ней усилий) и трудность установления определённой величины зажимающего усилия в промышленных держателях, — могут совершенно исказить закономерности для вносимых компонент и привести к большим расхождениям между расчётом и опытом.

Возможность использования этих формул на практике появится лишь при надлежащей конструкции и качестве выполнения держателя, а также после разработки методики установления нужных усилий зажатия. При этих условиях усилие зажатия может быть заранее рассчитано, исходя из требования получения необходимой механической прочности крепления кварца при возможно малом вносимом сопротивлении.

Из сказанного в данном параграфе также видно, что стабильность частоты кварца, укрепленного в держателе, существенно зависит от устойчивости зажатия. Так, из формулы (26) следует, что для рассматриваемого образца кварца (при $\sigma = 175 \text{ кг/см}^2$ и $d = 1$ мм) изменение σ на 1% вызывает относительное изменение частоты колебаний, равное $1 \cdot 10^{-6}$. Такие небольшие изменения усилия легко могут получаться как за счёт усталости материалов держателя, так и вследствие температурных влияний. Известно, что на практике готовые кварцы в держателях приходится некоторое время выдерживать, чтобы частота колебаний приняла бы устойчивое значение.

11. Резюмируем сказанное в этом параграфе:

1) сила взаимодействия в точках крепления колеблющегося кварца имеет комплексный характер, причём в нормальных условиях промышленного крепления кварца ($\sigma < 200 \text{ кг/см}^2$) упругая компонента её по величине во много раз может превосходить неупругую;

2) наличие упругой компоненты всегда приводит к увеличению частоты колебаний кварца; следовательно, эта компонента вызвана увеличением жёсткости колебательной системы кварц — держатель, что на эквивалентной электрической схеме кварца должно быть

отражено включением ёмкости последовательно в цепь динамических параметров его;

3) в пределах удельных давлений до 200 кг/см^2 , т. е. во всех случаях промышленного крепления кварца, упругая компонента и, следовательно, частота возрастают линейно с ростом силы зажатия;

4) при игольчатых упорах, в случаях удельных нагрузок, вдвое превышающих предел текучести материала упоров, изменения частоты, с ростом силы зажатия, прекращаются;

5) неупругая компонента, в условиях промышленного крепления кварца, является показательной функцией силы зажатия, с показателем равным двум;

6) при игольчатых упорах и нагрузках, вдвое превышающих предел текучести материала упоров, изменения сопротивления, с ростом силы зажатия, прекращаются;

7) при слабых зажатиях кварца между игольчатыми упорами, вносимое креплением сопротивление со временем уменьшается;

8) найденные закономерности для сил взаимодействия позволяют получить полуэмпирические расчётные формулы для обеих компонент вносимого креплением сопротивления кварца и, таким образом, хотя бы в первом приближении, решить вопрос о расчёте их;

9) промышленные конструкции держателей обычно имеют относительно большие поверхности механического контакта, чтобы обеспечить необходимую жёсткость крепления кварца. Из изложенного видно, насколько большую роль играет конструкция держателя и его механическое выполнение при больших поверхностях контакта; существующие конструкции держателей должны быть серьёзно улучшены путём переконструирования с учётом влияния возможных перекосов;

10) применённый для изложенных исследований осцилляторный метод измерений, позволяющий измерить одновременно обе компоненты сил взаимодействия и величины взаимных смещений контактирующих поверхностей, может оказаться полезным для исследований этих сил и выяснения их физической природы.

4. СОПРОТИВЛЕНИЕ, ВНОСИМОЕ ИЗЛУЧЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН

1. Компонента эквивалентного сопротивления кварца, обусловленная потерями энергии на излучение ультразвуковых волн, является компонентой, величина которой в ряде случаев поддается расчёту значительно легче, чем прочие.

Если кварц предназначен для работы в вакууме, знание этой компоненты существенно при изготовлении кварца, которое производится в воздухе при нормальном давлении. Если кварц предназначен для работы в воздухе, для его расчёта существенно знать зависимость этой компоненты от соотношения его размеров формы колебаний.

О возможности расчёта этой компоненты сопротивления имеются указания у Вигуре [7]. Расчёты влияния отражающих экранов для

идеального случая можно найти в работах по ультразвуковым интерферометрам, в частности в работе Хаббарда [18].

Ниже мы покажем, как зависит эта компонента от размеров кварца и что с известным приближением она может быть рассчитана.

2. Избыточное давление на поверхности плоского излучателя ультразвуковых волн при малых колебаниях, как известно, даётся выражением

$$p = \rho_g c z \dot{\xi},$$

здесь ρ_g — плотность газа, c — скорость звука в нем, $\dot{\xi}$ — скорость нормальных колебаний поверхности излучателя, z — комплексная функция размеров излучателя и длины волны звука в газе.

Нас будет интересовать вещественная составляющая z , которую мы обозначаем через r . Тогда сила реакции среды на всю поверхность излучателя, площадь которой S , при $\dot{\xi} = \text{const}$ для всех точек поверхности, будет

$$F_r = S \rho_g c r \dot{\xi}. \quad (27)$$

Применяя метод, изложенный в § 1, мы можем легко получить величину сопротивления, вносимого этой силой в эквивалентную схему кварца. Используя формулу (4), получаем

$$R_{gr} = \beta S \rho_g c r. \quad (28)$$

Расчётные формулы для R_{gr} можно получить из выражения (28), если известны: вид колебаний кварца и значение функции r .

3. Для реального случая кварца излучающая поверхность грани может быть принята плоской, но её размеры зачастую сравнимы с длиной волны звука в газе, и не всегда скорости точек поверхности грани нормальны к ней и имеют одинаковую величину по всей поверхности. Не следует забывать также, что деформации кварца всегда сложные, ибо основная — рабочая — деформация всегда связана с деформациями других типов и других направлений. Эти вторичные деформации увеличивают общее излучение кварца, что может привести к существенному отклонению действительной величины компоненты R_{gr} от расчётной.

Эти обстоятельства могут существенно усложнить вопрос о расчёте R_{gr} .

Однако в некоторых простейших случаях оказывается возможным рассчитать R_{gr} , если только наложить известные ограничения на соотношения размеров кварца.

В этих случаях вопрос сводится к определению, соответствующего данным условиям, значения функции r в формуле (28).

Исследования в этой области можно найти в работах по электроакустике. Однако там интересы направлены в сторону дисковых

или шаровых излучателей и притом для случаев, когда размеры их незначительны по сравнению с длиной волны звука в воздухе.

Для дискового поршневого излучателя, излучающего одной стороной [19], r является функцией

$$\frac{2\pi a}{\lambda} = m,$$

где a — радиус диска и λ — длина волны звука в газе.

В табл. 2 мы приводим значения функции r для некоторых значений m такого излучателя.

Таблица 2

m	1	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0
r	0,4	0,8	1,05	1,15	1,10	0,95

При дальнейшем увеличении m величины r все менее отклоняется от значения, равного единице. Начиная от $m = 1,6$, эти отклонения составляют не более $\pm 15\%$.

Если теперь для прямоугольной излучающей грани мы будем определять значение функции r по радиусу окружности, вписанной в прямоугольник этой грани, то, очевидно, мы не преуменим ошибки, если m , определенное таким способом, будет больше 1,5. Это значит, что следует ограничиться случаями, когда половина длины волны звука в газе меньше малого размера излучающей грани кварца.

В этих случаях полагаем $r = 1$ и, вместо формулы (28), получаем простую формулу

$$R_{gr} = \beta S_{g_2} c. \quad (29)$$

4. Для проверки полученных расчётных формул и определения порядка величин погрешности расчётов, вызываемой указанными в п. 3 допущениями, мы провели экспериментальное определение R_{gr} различных кварцев.

Измерения производились осцилляторным методом, и для уточнения применялся метод замещения. Процесс измерений состоял в следующем.

Промытый в спирту и хорошо просушенный кварц укрепляли в держателе, включённом в измерительную схему. Сразу же устанавливали баланс в измерительной цепи, и кварц закрывали стеклянным притёртым колпаком, из которого затем выкачивался воздух до 27 мм рт. ст. После этого последовательно с кварцем вводилось безреактивное сопротивление такой величины, чтобы получить прежний баланс в измерительной цепи. Величина введённого сопротивле-

ния равна действующему значению $\Delta R'_q$. По данным схемам затем рассчитывали коэффициент расстройки и определяли ΔR_q .

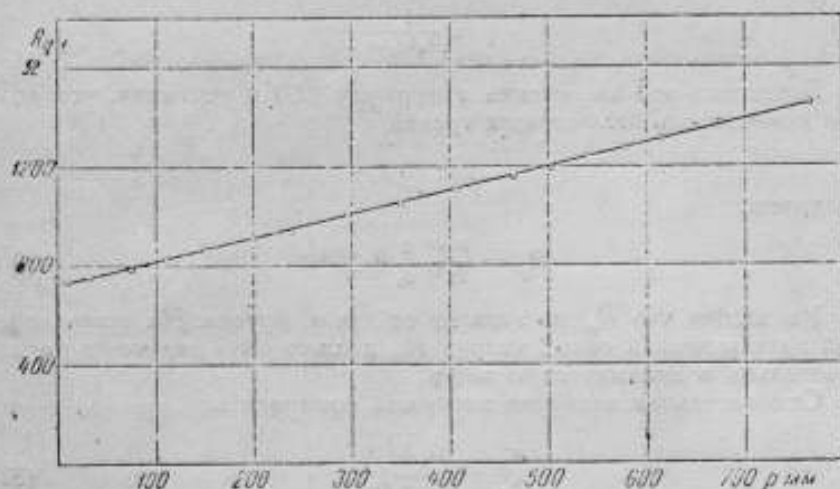


Рис. 14

Измерения были выполнены при давлении 25 мм рт. ст., и потому полученное путём измерений значение ΔR_q было меньше истинного.

Из формулы (28) следует, что R_q прямо пропорционально плотности газа (скорость звука c не зависит от ρ). На рис. 14 показана снятая нами зависимость R_q от давления газа, она линейна в пределах погрешности измерений. Следовательно, истинное значение R_{gr} могло быть получено путём пересчёта:

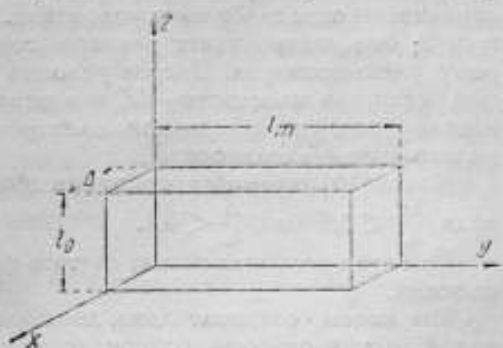


Рис. 15

$$R_{gr} = \Delta R_q \left(1 + \frac{27}{760}\right) = 1,035 \cdot \Delta R_q.$$

Для каждого кварца производилось три измерения, причём разброс численных значений измеренных величин был не более 1%.

5. Рассмотрим простейший случай бруска перпендикулярного среза (рис. 15).

Возбуждающий электрический потенциал приложен к граням d_0 , l_m ; излучающими являются грани l_0 , Δ .
Для такого бруска

$$\beta = \frac{1}{4e^2 l_0^2}.$$

Подставив это выражение в формулу (29) и учитывая, что полная поверхность излучающих граней

$$S = 2l_0 \Delta,$$

получаем

$$R_{gr} = \frac{\rho_r c}{2e^2} \frac{\Delta}{l_0} 9 \cdot 10^{11} \Omega. \quad (30)$$

Мы видим, что R_{gr} не зависит от длины бруска. На эквивалентной электрической схеме кварца R_{gr} должно быть включено последовательно в динамическую ветвь.

Относительная величина вносимой компоненты

$$\frac{R_{gr}}{R_{gr0}} = \frac{4\rho_r c}{\pi^2 \rho B} l_m \quad (31)$$

прямо пропорциональна длине бруска l_m .

Рассмотренный случай бруска кварца пригоден для экспериментальной проверки полученных выводов, если его размеры ограничены определёнными условиями. Первое условие было указано в п. 3; оно ограничивает размеры торцевого сечения бруска в сторону уменьшения их. Второе условие касается появления деформаций сдвига в плоскости YZ и в направлении оси X (см. рис. 15), всегда имеющих место при электрическом возбуждающем поле, направленном вдоль оси X .

Мэзон [10] указывает, что этими деформациями можно пренебречь, если $\frac{l_0}{l_m} < 0,2$ и $\frac{\Delta}{l_m} < 0,1$.

При этих условиях можно считать фронт звуковой волны в кварце плоским.

Мы имеем, следовательно, два противоречащих друг другу условия. С одной стороны, брусок должен быть тонким, чтобы удовлетворить условиям Мэзона, с другой — размеры его излучающих граней не должны быть малы, чтобы r не слишком отличалась от единицы.

Чтобы выяснить влияние размеров брусков на величину r , были произведены измерения с брусками различных размеров. Подставляя в формулу (30) численные значения

$\rho_r = 1,20 \cdot 10^{-3}$ г/см³; $c = 3,34 \cdot 10^4$ см/сек; $e = (4,77 \div 5,03) \cdot 10^4$ и принимая $r = 1$, получаем

$$R_{gr} = (7000 \div 7800) \frac{\Delta}{l_0} = a_r \frac{\Delta}{l_0}.$$

Значение a , будем определять, по экспериментальным данным при помощи формулы

$$a_r = R_{gr} \frac{l_0}{\Delta}. \quad (32)$$

Результаты экспериментального определения приведены в табл. К и 4.

Кварцы табл. 3 удовлетворяют обоим указанным выше условиям. Кварцы табл. 4 этим условиям не удовлетворяют.

Таблица 3

№№ кварцев	Размеры, мм			R_{gr} Ω	a_r	m
	Δ	l_0	l_m			
1	1,50	3,73	25,0	2940	7300	1,5
2	1,50	3,73	22,0	2840	7050	1,7
3	1,50	3,73	20,0	2660	6950	1,3
4	1,50	3,73	18,0	2850	7100	2,1
5	1,50	2,94	25,0	3900	7630	1,5
6	2,50	4,50	22,0	3900	7000	2,9
7	3,10	5,50	27,0	3940	7050	2,9

Из табл. 3 видно, что коэффициент a , сохраняет свою величину с точностью $\pm 5\%$ для различных соотношений размеров кварцев. Сравнивая результаты измерений кварцев №№ 1, 2, 3 и 4, а также №№ 5, 6 и 7, мы видим, что R_{gr} действительно не зависит от размеров l_m .

В табл. 4 два первых кварца не удовлетворяют условиям Мвзона. кварц № 3 этой таблицы уже не брусок, а пластинка. При измерениях было замечено, что, помимо колебаний растяжения-сжатия по длине, существовали также колебания изгиба. Видимо, этим следует объяснить резкое повышение a_r для этой пластинки.

Таблица 4

№№ кварцев	Размеры, мм			R_{gr}	a_r	m	$\frac{l_0}{l_m}$
	Δ	l_0	l_m				
1	2,00	5,45	20	3060	8350	2,4	0,27
2	2,00	8,30	20	1950	7350	2,4	0,41
3	0,75	5,50	27	1500	11000	0,75	0,20

Расхождения значений a_r в табл. 3 не могут быть объяснены ошибками измерений. Повидимому, функция γ для прямоугольных поршневых излучателей имеет более сложный вид. В среднем, измеренные значения a_r оказываются меньше теоретического значе-

ния. Одной из возможных причин этого может быть отклонение излучающей поверхности от плоскости (заточенные фаски), но играет роль также качество обработки поверхности кварца; полированные кварцы имеют несколько меньшее R_{gr} .

Однако, несмотря на ряд сделанных допущений, результаты измерений свидетельствуют о возможности расчёта R_{gr} с погрешностью, не выходящей за пределы, указанные выше ($\pm 15\%$).

6. Рассмотрим теперь кварц типа рис. 2г. Форма колебаний такого кварца показана на этом рисунке. Кварц претерпевает колебания сдвига в плоскости большой грани, но имеет симметричные относительно центра деформации. Поэтому такой кварц излучает всеми четырьмя узкими гранями, но углы поворота этих граней

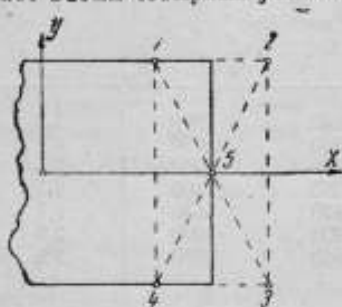


Рис. 16

вдвое меньше угла деформации пластинки, а потому и скорости точек поверхностей граней также вдвое меньше.

Таким образом, формально здесь безразлично: считать ли излучающей одну пару граней и скорость точек ее поверхности рассчитывать из деформации пластинки, или считать излучающими все четыре грани, но скорости принимать вдвое меньше, чем в первом случае.

Колебания реальной пластинки соответствуют второму случаю.

При колебаниях растяжения сжатия вдоль направления оси X (см. рис. 16), торцевая грань кварца занимает попеременно крайние положения 1—4 и 2—6.

При колебаниях сдвига в плоскости XY торцевая грань занимает крайние положения 1—3 и 2—4.

В первом случае (при $r=1$) силы реакции среды при излучении пропорциональны площади прямоугольника 1—2—3—4, так как скорости одинаковы во всех точках поверхности.

Во втором случае эти силы пропорциональны сумме площадей двух треугольников 1—2—5 и 4—5—3, равной половине площади прямоугольника 1—2—3—4.

Поэтому, при одинаковых максимальных скоростях граней, излучение грани, колеблющейся при чистом сдвиге, вдвое меньше, чем при растяжении — сжатии.

Уравнения колебаний кварцев, колеблющихся в режиме чистого сдвига, составляются в функции деформации сдвига в кристалле. Поэтому при составлении формулы для R_{gr} кварца рис. 2г нужно считать излучающими две узких грани пластинки и ввести коэффициент 0,5. Тогда для квадратной пластинки со стороной l , при толщине Δ , принимая опять $r=1$ (см. рис. 6)

$$R_{gr} = \frac{\rho_r c}{4\pi^2} \frac{\Delta}{l} 9 \cdot 10^{11} \Omega. \quad (33)$$

Если подставить сюда приведенные выше численные значения констант, то получаем

$$R_{gr} = 10\,000 \frac{\Delta}{l} \Omega.$$

Очевидно, для определения a_r из экспериментальных данных можно воспользоваться формулой (32).

Так как измеряемые пластинки имели не точно равные излучающие грани, но были прямоугольными, то мы вычисляли для них среднюю длину грани по формуле

$$l = \frac{ab}{a+b},$$

где a и b — длины узких краев.

Результаты измерений приведены в табл. 5.

Таблица 5

№№ кварцев	Размеры, мм			R_{gr} Ω	a_r	m
	Δ	a	b			
1	2,00	30,0	31,5	600	9250	1,85
2	2,00	24,0	21,5	835	9450	2,3
3	2,00	15,5	15,5	1260	9750	3,6

Кварцы №№ 2 и 3 получены путём обрезки кварца № 1. С уменьшением размеров сторон a_r растёт, что может быть объяснено увеличением m , которое здесь рассчитано так же, как и в случае брусков по формуле

$$m = \frac{\pi \Delta}{\lambda}.$$

В этом опыте также можно считать вполне удовлетворительным совпадение экспериментального значения a_r с расчётным.

7. Далее нами были произведены измерения с кварцами типа рис. 2в. Это кварцы косых срезов АТ и ВТ, с низким температурным коэффициентом частоты, которые широко используются на практике для частот свыше 500 килогерц. Частота колебаний таких кварцев определяется толщиной пластинки, но активность и температурный коэффициент зависят от размеров x и z' (рис. 17). Путём изменения размера x добиваются максимальной активности, хорошую частотно-температурную зависимость затем получают изменением z' . Из сказанного следует, что колебания такой пластинки сложные, и расчеты, подобные произведенным нами выше, здесь применены быть не могут.

Приводим несколько цифр, характеризующих порядок величины вносимого излучением сопротивления, для пяти пластинок с размерами $1,6 \times 24 \times 12$ мм (табл. 6).

Таблица 6

№№ кварцев	1	2	3	4	5
R_{gr} , Ω	5,5	4,7	10,0	5,0	21,0

Помимо того, что значения R_{gr} получаются значительно различающимися, их относительная величина весьма мала ($R_{gr} \approx 70 \Omega$). Если, пользуясь приведенным выше методом, рассчитать R_{gr} , предпо-

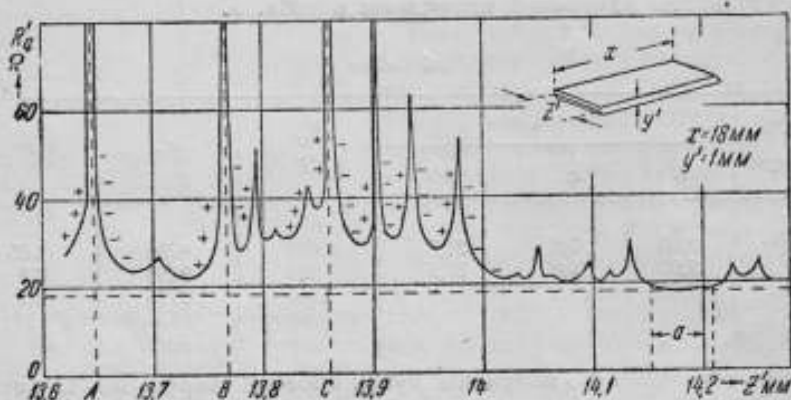


Рис. 17

лагая, что здесь имеет место чистый сдвиг, как показано на рис. 26, то мы получим величину R_{gr} порядка 1000 Ω , т. е. в 200 раз больше измеренных величин.

Специальные измерения, произведенные нами с целью установить, излучают ли большие грани пластины ультразвуковые волны, показали, что такого излучения или совсем нет, или оно очень мало. Можно думать, что подгонка размеров x и z пластинок приводит к появлению узлов колебаний на узких гранях, т. е. к резкому уменьшению излучения.

8. Для простейших случаев мы можем установить правило вывода формул для R_{gr} . В самом деле, в формуле (5) для R_{gr} входят все три размера кварца, так как потери распределены по всему объему его; в формулу же для R_{gr} входят только те размеры, которые определяют площадь излучающей грани. Но ввиду того, что добавочные силы в том и другом случае пропорциональны скорости деформаций и одинаково учитываются в уравнении движения кварца,—

функция размеров φ_0 в выражениях для R_v может быть получена из формулы

$$\varphi_0 = \frac{\Delta}{S}$$

см. уравнение 5) путём исключения размера, не входящего в определение площади излучающей грани. В зависимости от того, какая грань является излучающей, возможны только два вида функции размеров φ_r в выражениях для R_v , а именно:

1) если излучающая грань перпендикулярна к возбуждаемой (например, рассмотренный в п. 5 брусок), то

$$\varphi_{r1} = \frac{\Delta}{a} \left(\text{или } \frac{\Delta}{b} \right); \quad (34)$$

2) если она совпадает с возбуждаемой гранью, то

$$\varphi_{r2} = \frac{1}{ab}. \quad (35)$$

В первом случае относительная величина компоненты, вносимой излучением, будет пропорциональна

$$\frac{\varphi_{r1}}{\varphi_0} = b \text{ (или } a),$$

т. е. размеру, определяющему частоту колебаний.

Во втором случае она пропорциональна

$$\frac{\varphi_{r2}}{\varphi_0} = \frac{1}{\Delta},$$

т. е. обратно пропорциональна размеру, определяющему частоту колебаний.

Если теперь обозначить, учтя излучение симметричной пары граней,

$$a_r = \frac{\rho_r c}{2e^2} r \quad (36)$$

и учесть, что плотность газа прямо пропорциональна давлению P и обратно пропорциональна абсолютной температуре T , то для R_v получаем

$$R_v = a_r \varphi_r \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T}, \quad (37)$$

где P_0 и T_0 — давление и температура, при которых было определено значение a_r .

9. На основании сказанного в этом параграфе, мы можем сделать следующие выводы:

1) величина сопротивления, вносимого в эквивалентную схему кварца ультразвуковым излучением, для простейших форм колебаний, может быть рассчитана с точностью $\pm (10 \div 15)\%$;

2) в этих случаях зависимость $R_{\text{эф}}$ от размеров кварца получается из зависимости от них сопротивления $R_{\text{в0}}$ путём исключения из неё размера, не входящего в определение площади излучающей грани;

3) относительная величина компоненты $R_{\text{эф}}$ в тех случаях, когда излучающая грань перпендикулярна возбуждаемой, пропорциональна размеру, определяющему частоту колебаний кварца, но в случаях, когда эти грани совпадают, она обратно пропорциональна размеру, определяющему эту частоту.

5. СОПРОТИВЛЕНИЕ, ВНОСИМОЕ СВЯЗАННЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ КВАРЦА

1) При возбуждении бруска перпендикулярного среза (см. рис. 15) электрическим полем, направленным вдоль оси X , помимо деформации растяжения — сжатия вдоль осей X и Y , возникают также деформации сдвига в плоскости YZ . При тонких брусках, частоты f_x и f_y далеки друг от друга; частота же колебаний сдвига f_{xy} имеет тот же порядок, что и частота f_y , и при известных соотношениях размеров ($\frac{l_x}{l_m} = 0,23$) частоты эти совпадают. Изображая эквивалентную электрическую схему такого кварца, мы должны составить ее из двух связанных электрических контуров, причём собственную частоту колебаний каждого из них мы можем менять, изменяя соответствующие размеры кварца.

При взаимной настройке контуров, эквивалентное активное сопротивление основного контура возрастает за счёт сопротивления, вносимого вторичным контуром.

Модули упругости кварца для разных деформаций имеют различные температурные коэффициенты, а поэтому температурные коэффициенты собственных частот двух связанных контуров такой сложной эквивалентной схемы будут различны по величине и, может быть, по знаку. Поэтому, при изменении температуры кварца, расстройка эквивалентных контуров будет изменяться, и, следовательно, будет меняться величина компоненты вносимого сопротивления.

Так как вязкость кристалла кварца, в пределах климатических изменений температуры, может считаться постоянной, то наличие зависимости сопротивления кварца от температуры является признаком существования в нём связанных колебаний.

Вторым признаком существования связанных колебаний является изменение частоты колебаний кварца, обусловленное реактивным сопротивлением, вносимым вторым колебанием. Это изменение особенно велико вблизи резонанса, когда приращение частоты резко меняет знак на обратный, причём большей частью этот процесс происходит разрывно (связь больше критической). Однако, в силу

того, что изменения частоты колебаний с температурой происходят одновременно также за счёт изменения параметров основного контура, этот признак наличия связанных колебаний (не в непосредственной близости к резонансу), в противоположность первому признаку не является достаточным.

2. Рассмотренный пример кварца-бруска является простейшим. Анализ колебаний в таком кварце не представляет особых трудностей. Но задача во много раз усложняется, когда мы обращаемся к таким кварцам, у которых собственная частота определяется меньшим геометрическим размером (колебания пластинок по толщине). Здесь возможность появления связанных колебаний возрастает в значительной степени как за счёт гармонических колебаний высших порядков по другим размерам, так и за счёт всегда имеющихся отклонений формы пластинки от идеальной. Последнее приводит к отклонению фронта волны от плоского, а следовательно, к появлению искаженного отражения от граней пластинки.

На рис. 17 приведён график, изображающий зависимость эквивалентного сопротивления кварца-пластинки косо́го среза (АТ-срез) от размера z' , т. е. от её ширины.

Число, интенсивность и расположение пиков сопротивления зависит от остальных размеров пластинки и от её плоскопараллельности, причём достаточно ничтожных изменений этих данных, чтобы совершенно изменить характер всего графика. Величина сопротивления, при некоторых значениях размера z' , возрастает настолько, что колебания генератора срываются (точки А, В, С).

Если нагревать такую пластинку, то сопротивление её также изменяется; типичная зависимость этого рода показана на графике рис. 18, на котором, кроме того, приведено изменение частоты колебаний.

Характер изменений сопротивления и частоты подтверждает ранее высказанное соображение о том, что здесь мы имеем дело с явлением затягивания.

Ширина пиков сопротивления может быть весьма различна; она, очевидно, определяется величиной связи между колебаниями и разностью температурных коэффициентов их частот.

Высота пиков также может быть различной и, даже при очень малых изменениях частоты ($\frac{\Delta f}{f} < 5 \cdot 10^{-3}\%$) резонанса, может достигать сотен процентов от $(R_s)_{\min}$ (см. пик I на рис. 18).

Если для различных значений z' (рис. 17) снимать также зависимости типа рис. 18, прогретая кварц, — можно убедиться, что пики сопротивления на обоих рисунках являются следствием одной и той же причины. На рис. 17 значками (+) отмечены те точки, в которых сопротивление растёт с повышением температуры, значками (—) — те точки, в которых оно падает при этом.

Рассматривая расположение значков (+) и (—) на рис. 17, мы видим, что, при увеличении температуры, вся гребенка пиков как

бы смещается влево. Таким образом, нагрев кварца приводит к кажущемуся увеличению размера z' . Очевидно, охлаждение приведёт к обратному результату.

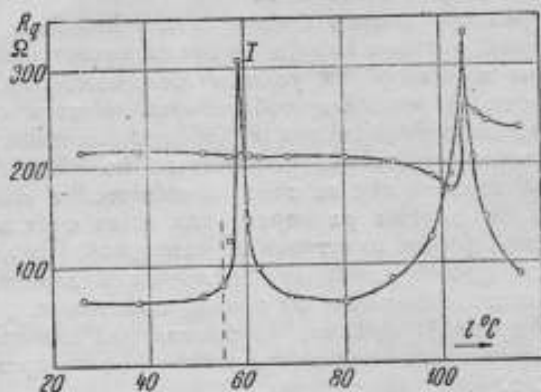


Рис. 18

При изготовлении кварцев такого типа, подтачивают грань x , тем самым уменьшая размер z' до тех пор, пока в пределах требуемого интервала температур частота колебаний перестанет претерпевать скачки, подобные изображённым на рис. 18. На рис. 17 такой участок размеров z' помечен буквой a . Мы видим также, что на этом участке сопротивление постоянно и его абсолютная величина меньше, чем при любом другом значении z' на рис. 17.

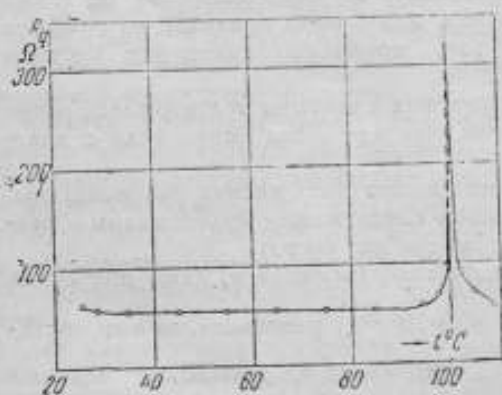


Рис. 19

Если в пределах участка a сопротивление кварца действительно неизменно, — можно считать, что здесь компонента вносимого сопротивления $R_{q1} = 0$. Теперь компонента R_{q1} может быть определена для любого значения z' , если начало координат на рис. 17 перенести из точки 0 в точку $R_{q1} = 18,5 \Omega$ (горизонтальная пунктирная линия).

3. При удачно подобранном размере z' сопротивление остаётся совершенно неизменным в нужном интервале температур (см. рис. 19). Наоборот, при неправильном размере z' , сопротивление изме-

няется, и по характеру его изменения можно судить о наличии пиков даже за пределами исследуемого интервала температур.

Например, если желательный интервал температур у кварца, для которого получен график рис. 18, ограничен температурой 55°C (показано пунктиром), то на основании хода температурной зависимости сопротивления можно предсказать наличие пика сопротивления при температурах, больших 55°C . В то же время это было бы весьма затруднительно сделать на основании рассмотрения только частотно-температурной зависимости.

Второй ценный вывод, вытекающий из нашего рассмотрения, — это определение причин высокого температурного коэффициента частоты. Примером этого может служить интервал температур от 90 до 100° на рис. 18. Снимая одну лишь частотно-температурную зависимость кварца в указанном интервале, мы можем объяснить большие изменения частоты ошибкой в углах среза кварца. Но, если снять одновременно кривую сопротивления, — становится очевидным, что более вероятной причиной является вносимое сопротивление. При этом можно ограничиться весьма небольшим интервалом температур. Часто бывает, что пик сопротивления очень широк и, хотя его вершина находится далеко за пределами исследуемого интервала температур, — ветвь его захватывает весь этот интервал.

Наконец, третий вывод состоит в том, что даже весьма малые скачки частоты легко обнаруживаются по пикам сопротивления, т. е. без применения частотоизмерительной аппаратуры.

4. Резюмируя сказанное, приходим к следующим заключениям:

1) связанные колебания в кварце вносят дополнительное сопротивление, величина которого определяется механической связью между колебаниями и характеристиками связанной колебательной системы;

2) если в кварцах, частота которых определяется большим линейным размером, R_q может играть существенную роль в определенной R_q только при немногочисленных и строго определенных соотношениях их линейных размеров, то в кварцах, частота которых определяется их меньшим размером, наоборот, требуются строго определенные соотношения размеров для того, чтобы R_q было мало;

3) в кварцах косых срезов компонента R_q может во много раз увеличивать сопротивление кварца и приводить его в непригодное для использования состояние;

4) признаком присутствия компоненты R_q в сопротивлении кварца является его зависимость от температуры; отсутствие зависимости сопротивления от температуры свидетельствует об отсутствии вносимого связанными колебаниями сопротивления;

5) в кварцах косых срезов пики сопротивления на температурном графике свидетельствуют о наличии скачков частоты и являются лучшим показателем их наличия.

6. СОПРОТИВЛЕНИЕ, ВНОСИМОЕ НАНЕСЕННЫМ НА ГРАНИ КВАРЦА МЕТАЛЛИЧЕСКИМ СЛОЕМ

1. Металлизированные кварцы широко используются сейчас в радиотехнике. Они весьма удобны в эксплуатации и обходятся дешевле в производстве, потому что держатели для них проще конструктивно и в изготовлении. Металлический слой наносит различными способами: химическим, гальваническим, а также испарением металла в вакууме.

Металлический слой увеличивает сопротивление кварца за счёт внутреннего трения в металле покрытия. В литературе почти нет сведений о степени увеличения затухания кварца, вызываемого этой причиной.

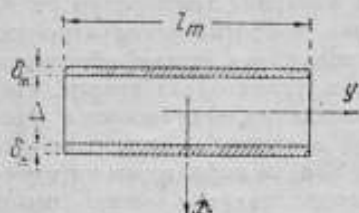


Рис. 20

Автору удалось найти посвящённую этому вопросу работу Гоккеля [20], в которой приводится очень скудный материал по измерению дополнительного затухания. Гоккель говорит, что разницы между затуханием непокрытого кварца и слабо серебряного ему обнаружить не удалось, однако „сильное“ серебрение может увеличить затухания кварца вдвое.

При измерении затухания кварцев Ван Дайк [13] применял металлизированные кварцы, и для того, чтобы исключить влияние металлического слоя и получить в результате затухание чистого кварца, предварительно снимал зависимость затухания от толщины слоя металла. Он указывает, что получающаяся зависимость линейна, и поэтому для определения затухания непокрытой пластинки можно было применить линейную экстраполяцию.

2. Рассмотрим кварцевый брусок, покрытый металлом на гранях, перпендикулярных к электрической оси (см. рис. 20). Пусть толщина слоя металла равна δ_m .

Предполагая весьма тонкое покрытие, мы допустим, что распределение деформаций в плоскости сечения, перпендикулярной направлению смещения, остаётся равномерным и что, следовательно, деформации в слое металла имеют такую же величину, как и в кварце.

Величина силы внутреннего трения, обусловленная вязкостью самого кварца [6],

$$F = S \rho B \xi, \quad (38)$$

где S — площадь сечения бруска, ρ — плотность и B — вязкость кристалла, ξ — скорость деформаций в сечении S .

Аналогично для слоя металла

$$F_m = S_m \rho_m B_m \xi. \quad (39)$$

Суммарная сила получается сложением выражений (38) и (39):

$$F' = F \left(1 + \frac{S_m \rho_m B_m}{S \rho B} \right) \xi.$$

Поэтому

$$R_{q0} + R_{qm} = \frac{\pi^2 \rho B \Delta}{3e^2 l_0 l_m} \left(1 + \frac{S_m \rho_m B_m}{S \rho B} \right). \quad (40)$$

Так как (см. рис. 15)

$$S_m = 2\delta_m l_0, \quad S = l_0 \cdot \Delta;$$

то

$$R_{qm} = \frac{\pi^2 \rho_m B_m}{4e^2} \frac{\delta_m}{l_0 l_m} 9 \cdot 10^7 \Omega. \quad (41)$$

Отсюда видно, что абсолютная величина R_{qm} не зависит от Δ .
Относительная величина

$$\frac{R_{qm}}{R_{q0}} = \frac{\rho_m B_m}{\rho B} \frac{2\delta_m}{\Delta} \quad (42)$$

зависит, при прочих равных условиях, только от отношения $\frac{\delta_m}{\Delta}$, т. е. от отношения толщины покрытия к толщине кварца.

Из выражения (41) также следует, что R_{qm} является линейной функцией толщины покрытия δ_m .

3. Для эксперимента был использован кварц типа рис. 2а с размерами $l_m = 2,7$ см; $l_0 = 0,5$ см; $\Delta = 0,075$ см.

Предварительно, химическим способом кварц был покрыт очень тонким слоем серебра. Далее, на этот слой наращивался гальваническим путём никель. Ток через ванну и расположение кварца между электродами поддерживались одними и теми же.

Продолжительность электролиза контролировалась по секундомеру. Через известные промежутки времени кварц вынимали из ванны, промывали в дистиллированной воде и спирту, высушивали и измеряли, зажимая в игольчатый держатель. Различные условия зажатия (точки зажатия) вызвало некоторый разброс результатов.

После окончания опыта кварц взвешивался на аналитических весах, и по приращению веса определялось количество осажденного никеля. Отсюда, зная площадь покрываемых граней, находили толщину покрытия.

На рис. 21 показаны результаты такого эксперимента. До толщины слоя $0,2 \mu$ сопротивление уменьшается, а затем, растёт линейно в функции толщины. Возможное объяснение уменьшения сопротивления будет дано в § 7.

Наклон прямой, проведенной по экспериментальным точкам, равен

$$\frac{R_{qm}}{\delta_m} = 0,5 \cdot 10^7 \Omega/\text{см.}$$

Подставив это значение в формулу (41), получим коэффициент внутреннего трения никеля

$$\mu_m = \rho_m B_m = 6 \cdot 10^3 \text{ г/см. сек.}$$

Наш эксперимент не претендует на большую точность и требует дополнительной проверки при более тщательных измерениях. В то же время проверить правильность полученного значения μ_m невозможно, так как имеющиеся в литературе сведения о значении

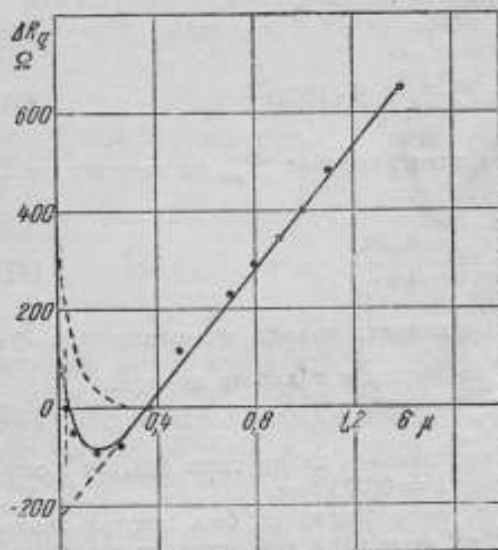


Рис. 21

коэффициентов внутреннего трения металлов весьма скудны и отличаются своим разнообразием. Одной из последних работ является работа Кимби [22], где он измеряет μ_m методом затухания стержня, изготовленного из испытуемого металла. По данным этого автора, μ_m для алюминия равно 545 и для меди — 2880 г/см. сек.

Однако, по нашему мнению, наложенный метод может оказаться весьма удобным для измерения вязкости металлов при малых деформациях.

Судя по всему, точность его может быть весьма удовлетворительной. Возражение, которое напрашивается здесь, а

именно, что неизвестно влияние шероховатостей поверхности кварца, видимо, не играет существенной роли, так как в противном случае линейность зависимости рис. 21 не соблюдалась бы.

4. Мы рассмотрели случаи, когда металлический слой подвергался тем же деформациям, что и самый кварц. Этот случай может быть распространён также на кварцы типа рис. 21.

Для R_{gm} такого кварца легко получаем выражение

$$R_{gm} = \frac{\pi^2 \rho_m B_m \delta_m}{4c^2 l^2} 9 \cdot 10^9 \text{ Ом.} \quad (43)$$

Однако в тех случаях, когда слой нанесён на грани, в плоскости которых деформаций нет, например, в случаях кварцев типов рис. 26 и в, роль металлического покрытия в изменении затухания кварца резко падает. В этих случаях слой в основном сказывается на частоте колебаний, так как увеличивает эквивалентную массу пластинки.

5. Таким образом, мы приходим к следующим выводам:

1) компонента сопротивления, вносимая металлическим покрытием деформирующихся граней кварца, легко может быть рассчитана, на основе предварительных измерений коэффициента μ_m металла покрытий;

2) абсолютная величина этой компоненты в этих случаях, при прочих равных условиях, не зависит от толщины пластинки или бруска и пропорциональна толщине слоя металла;

3) относительная величина её зависит только от отношения толщины металла к толщине кварца;

4) измерение сопротивления кварца, покрытого металлом, может служить простым и точным методом измерения коэффициентов внутреннего трения металлов в тонких слоях и при малых деформациях.

7. СОПРОТИВЛЕНИЕ, ВНОСИМОЕ ПОТЕРЯМИ ЭНЕРГИИ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ КВАРЦА.

1. Ван Дайк [13], а затем Мэзон [10] установили, что затухание кварца зависит от обработки его поверхности. Они нашли, что травление кварца в плавиковой кислоте или полировка поверхностей его граней уменьшают затухание резонатора. По их объяснению, это происходит потому, что эти операции снимают верхний, разрушенный при шлифовке граней слой, испещрённый микроскопическими трещинками, в которые набиваются осколки кварца и кусочки абразива. В результате внутреннее трение в этом слое имеет значительно большую величину, чем в кристалле, и затухание кварца возрастает.

Известно также, что если металлизировать кварц и довести слой металла до значительной толщины (порядка 50μ), то такой слой легко снимается с поверхности грани в виде целого листочка, причём кварц после такой обработки также уменьшает свое затухание.

Никаких количественных зависимостей, однако, для затухания кварца различным способом обработанного, в литературе нет.

2. Прежде чем перейти к изложению и обсуждению результатов эксперимента, проведенного нами с целью внести ясность в затронутый вопрос и для выявления возможности расчёта вносимого поверхностным слоем сопротивления, необходимо остановиться на самой методике измерений.

Эта методика была общей для измерения этой компоненты сопротивления, а также компонент R_{90} , R_{90} и R_{90} .

Ввиду малой относительной величины всех этих компонент, измерения должны были производиться возможно тщательно и с минимальной погрешностью.

Мы остановимся сейчас на возможных погрешностях при наших измерениях.

А. Погрешность измерительного прибора (измеритель эквивалентных параметров кварца) была сведена к минимуму путём питания его от стабильных источников напряжений и применением высококачественного переменного конденсатора в сетке. В качестве последнего был использован прецизионный конденсатор с 2500 отсчётными точками.

Устойчивость показаний прибора во времени проверялась путём измерения одного и того же кварца в течение 8 часов. Она оказалась не выходящей за пределы 1%. Однако, чтобы уменьшить и эту ошибку, был применён контрольный кварц, предварительно проверенный путём продолжительных измерений на устойчивость своего сопротивления. Наличие такого кварца позволяло в любой момент контролировать прибор. Позднее, вместо контрольного кварца, был применён его эквивалент, составленный из катушки самоиндукции и сопротивления. Последний следует рекомендовать ввиду большей надёжности и простоты.

При этих условиях погрешность прибора определялась в основном погрешностью градуировки, отсчёта на шкале и погрешностью таблицы и имела величину не более 1%.

Б. Погрешность, вносимая креплением кварца, является наиболее неопределённой.

Ван Дайк [13] применял подвешивание металлизированного кварца на двух тонких металлических нитях, приклеенных шеллаком к металлизированным граням в узловых точках колебаний.

Гюнтер [21] подвешивал кварц на двух штифтах, входивших в углубление, специально просверленные в толще кварца в узловых точках.

Мэзон [10] применял зажатие в игольчатом держателе.

Имея в виду производить измерения с большим числом кварцев и считая, на основании результатов эксперимента с игольчатыми упорами приведённых в § 3, что такое крепление наиболее совершенно, — мы остановились на игольчатом держателе. Для этого мы использовали специально сконструированный держатель, который с помощью пружины обеспечивал всегда одно и то же усилие зажатия. Контроль правильности зажатия производился путём увеличения силы зажатия с помощью рычага.

При правильном зажатии сопротивление кварца не менялось, что видно было по поведению стрелки гальванометра измерительного прибора.

Выбор точки зажатия производился на-глаз. Конечно, здесь приходилось идти путём ряда проб, пока не получался хороший результат.

Приводим результаты измерений для двух кварцев типа рис. 2а с размерами $\Delta = 0,25$ см; $l_0 = 0,45$ см; $l_m = 2,2$ см.

Таким образом, можно было принять для этих кварцев полную вариацию измеряемой величины не более 100 Ω .

Мы будем считать (как увидим ниже, такое предположение близко к действительности), что полная наибольшая погрешность, вносимая креплением, имеет порядок не выше 100 Ω .

Кварц № 1

№№ точек зажатия	1	2	3	4
R_q	4620	4700	4633	4647
$R_q - (R_q)_{\min}$.	0	80	68	27

Кварц № 2

№№ точек зажатия	1	2	3	4
R_q	4345	4406	4396	4333
$R_q - (R_q)_{\min}$.	17	68	58	0

Все измерения были проведены с кварцами указанных выше размеров. Это было сделано потому, что, во-первых, в кварцах типа рис. 2а компонентой R_q можно пренебречь, что значительно труднее сделать для пластинок, колеблющихся по толщине; во-вторых, в таких кварцах деформациям подвергается наибольшая доля всей их поверхности; в-третьих, этих кварцев в нашем распоряжении было большее количество, чем других.

В. Погрешность, вносимая слоем влаги и слоем загрязнений на поверхности граней, может иметь весьма большую величину.

Для иллюстрации приводим следующие результаты измерений с четырьмя кварцами одинаковых размеров:

Сопротивление в омах

Состояние кварца	Сопротивление в омах			
	кварц № 1	кварц № 2	кварц № 3	кварц № 4
После промывки в воде, сушки фильтрованной бумагой и на воздухе в течение 10 минут	17000	20500	20300	14000
После сушки на солиде в течение 2 часов	5200	4970	4940	5700
После нагревания до 100° С	4370	4330	4350	5300

Чтобы полностью устранить влияние влаги, необходимо работать в вакууме, но так как это крайне усложнило бы многочисленные измерения, мы применяли нагрев кварцев. Для этого кварцы раскладывались на листе чистой бумаги, подожженной на толстую латунную пластинку, нагреваемую электрической плиткой. При измерениях кварцы вставлялись в держатель в тёплом состоянии.

После подбора точки зажатия, в течение некоторого времени наблюдались показания гальванометра, так как в некоторых случаях по мере охлаждения кварца происходило небольшое уменьшение его сопротивления, причины которого не ясны.

Так как кварцы указанных выше размеров имели сопротивление в среднем порядка 4500 Ω , абсолютная погрешность за счёт ошибки прибора составляла

$$4500 \cdot 1 \cdot 10^{-2} = \pm 45 \Omega,$$

что в сумме с максимальной погрешностью крепления даёт общую погрешность измерения $\pm (55 \div 145) \Omega$.

Производя многократные измерения для большого числа однотипных кварцев, можно было снизить эту погрешность до $\pm (30 \div 70) \Omega$, что и было принято за оценку точности.

Кроме указанных погрешностей, необходимо было также учесть компоненты сопротивления R_{gr} и R_{gm} .

Первая компонента была тщательно промерена многократными измерениями с пятью кварцами и оказалась равной

$$R_{gr} = 3900 \pm 35 \Omega,$$

вторая компонента была определена из графика рис. 21. Продолжительность никелирования была выбрана соответствующей минимальному сопротивлению кварца (см. рис. 21). Тогда компонента

$$R_{gm} = 100 \pm 15 \Omega,$$

В сумме обе компоненты дают

$$R_{gr} + R_{gm} = 4000 \pm 50 \Omega.$$

3. Так как в число факторов, вносящих погрешность, входят также такие факторы, как внутренние дефекты структуры кристалла кварца, мы приняли для измерения статистический метод, измеряя большое число кварцев и выводя среднее из всех измерений.

Первоначально было измерено сопротивление 30 кварцев, поверхности граней которых были шлифованными.

Среднее значение сопротивления оказалось равным

$$R_q = 4460 \pm 50 \Omega.$$

Если из этой величины вычесть определенные ранее значения компонент R_{gr} и R_{gm} , то получим остающееся сопротивление

$$\Delta R_q = R_q - (R_{gr} + R_{gm}) = (400 \div 500) \Omega,$$

которое, очевидно, должно определяться потерями энергии в кристалле кварца и в поверхностном слое граней.

4. Чтобы выяснить величину сопротивления, вносимого поверхностным слоем, были проведены опыты с травлением кварца.

Три кварца протравливались в концентрированной плавиковой кислоте в течение различного времени и промерялись. Травление

производилось 0,5; 1; 2; 3; 5 и 10 минут. Кроме того, 10-минутному травлению подверглись еще семь кварцев. Результаты измерений приведены на рис. 22.

Как видим, вначале сопротивление растёт и лишь после 1,5-минутного травления начинает уменьшаться; после 10-минутного травления оно остаётся постоянным.

Разница между первоначальным сопротивлением кварца и конечным оказалась равной

$$R_{qs} = 4400 - 3960 = 440 \pm 100 \Omega,$$

т. е. равной остающемуся сопротивлению.

Этот результат показывает, что остающееся сопротивление в основном определяется потерями в рыхлом поверхностном слое на гранях кварца.

Чтобы исключить сомнение, вызываемое неуверенностью, что производимая после каждого травления металлизация даёт всегда одинаковое значение $R_{\text{пр}}$, был поставлен контрольный опыт, заключающийся в том, что после 10-минутного травления и металлизации измерялось сопротивление кварца в двух случаях: 1) непосредственно после указанной операции; 2) после шлифования наждаком узких, непокрытых граней (Δ , l_m). Это должно было дать увеличение сопротивления кварца за счёт потерь, вносимых шлифованной поверхностью этих граней.

Результат оказался неожиданным — сопротивление возросло до 4400 — 4500 Ω , т. е. приrost был равен прежней величине, порядка 500 Ω . Эти измерения были повторены и каждый раз давали одинаковый результат.

Далее были проведены измерения с полированными кварцами. Эти измерения были затруднены тем, что слой металла плохо держался на полированной поверхности граней и сходил даже при лёгком прикосновении пальцем. Это привело к тому, что измерения пришлось несколько раз повторять.

После шлифовки наждаком тех же узких граней сопротивление всех 5 испытуемых кварцев оказалось в среднем равно 4350 Ω , приrost же сопротивления оказался равным 740 Ω .

Специальным экспериментом было установлено, что сопротивление излучения у полированных кварцев меньше, чем у шлифованных примерно на 200 Ω . Таким образом, увеличение прироста сопротивления на 240 Ω может быть объяснено этим обстоятельством.

Неувязку результатов измерений методом шлифовки узких граней с первоначальными измерениями можно объяснить, предположив, что нанесение металла на шлифованную грань резко уменьшает, а может быть и полностью устраняет, потери энергии в поверхностном слое.

Таким предположением может быть объяснён также ход кривой на рис. 21, когда, при тонких слоях металла, сопротивление уменьшается с увеличением толщины слоя.

Сделав такое предположение, мы должны считать, что во всех случаях наших измерений потери энергии в поверхностном слое граней, покрытых металлом, отсутствуют и сосредоточены лишь на узких гранях (Δ, l_m).

Ниже будет дано еще одно подтверждение высказанного предположения.

Мы установили, что сопротивление, вносимое потерями энергии в шлифованных поверхностных слоях кварцев рассматриваемого типа, имеет величину

$$R_{qs} = 440 \pm 100 \Omega.$$

Мы увидим ниже, что для исследуемых кварцев компонента сопротивления, обусловленная внутренним трением в кристалле,

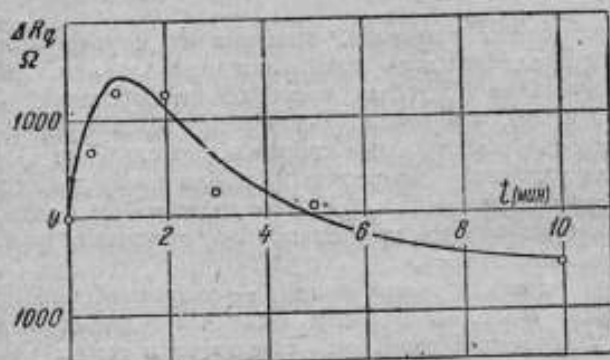


Рис. 22

должна иметь величину порядка 80 Ω, следовательно, это значение R_{qs} и полученное ранее значение ΔR_q находятся в соответствии, принимая во внимание погрешности измерений.

5. Если считать, что поверхностный слой, в котором происходит рассеяние энергии колебаний кварца, обладает коэффициентом внутреннего трения μ_s и имеет толщину δ_s , то таким же путём, как и в случае сопротивления, вносимого механическим покрытием, — мы можем найти выражение для R_{qs} кварцев типа рис. 2а:

$$R_{qs} = \frac{\pi^2 \mu_s \delta_s}{4e^2} \frac{\Delta}{l_m l_0^2} 9 \cdot 10^9 \Omega. \quad (44)$$

Приняв среднее значение для $R_{qs} = 450 \Omega$ и используя формулу (44), получаем

$$\mu_s \delta_s = 0,9.$$

Необходимо тут же отметить, что для некоторых отдельных кристаллов травление вызывает увеличение сопротивления изготовленных из них кварцев. Вместо кривой типа рис. 22, получается монотонное возрастание сопротивления кварца.

После продолжительного (в течение суток) травления таких кварцев они становились мутнобелыми, непрозрачными и легко разламывались на куски.

6. Из всего сказанного выше делаем следующие выводы:

1) разрушенный шлифованием поверхностный слой граней вносит дополнительное затухание кварца;

2) травление в плавиковой кислоте или полирование граней, снимая верхний разрушенный слой и обнажая чистую кристаллическую структуру кварца, снижают его сопротивление и, повидимому, полностью устраняют компоненту эквивалентного сопротивления, вносимую потерями в поверхностном слое;

3) есть основания предполагать, что покрытие шлифованных граней кварца слоем металла также устраняет потери в поверхностном слое их;

4) продолжительность травления должна быть достаточной для снятия всего поверхностного слоя, иначе может произойти не уменьшение, а увеличение сопротивления кварца;

5) коэффициент потерь в шлифованном слое кварца имеет устойчивую величину и определённый экспериментально может быть введён в расчетные формулы для R_{gr} .

8. СОПРОТИВЛЕНИЕ, ОБУСЛОВЛЕННОЕ ВНУТРЕННИМ ТРЕНИЕМ И ДЕФЕКТАМИ КРИСТАЛЛА КВАРЦА

1. Весьма трудно предположить наличие внутреннего трения в монокристалле. Но реальный кристалл всегда имеет неоднородности решётки, обусловленные переменными условиями роста (среда, температура и т. д.), что делает допустимым предположение о наличии в нём потерь энергии за счёт неоднородностей структуры.

К числу дефектов структуры решётки кристалла можно также отнести двойниковые включения, которые обнаруживаются с трудом, если их размеры малы.

Кроме дефектов структуры, существуют и другие, например: включения инородных тел, пузырьки (обычно наполненные водой), свиля, муть, внутренние трещинки, наружные заколы и т. д. Предварительная отбраковка сырья, а также нарезанных заготовок производится по наличию этих дефектов путём просмотра кристалла при сильном боковом освещении. Таким, зрительным способом можно обнаружить лишь те дефекты, размер которых больше разрешающей способности глаза; более мелкие дефекты такого рода этим способом не обнаруживаются, иных же способов не применяют, считая более мелкие дефекты несущественными для производства.

Таким образом, кристалл не однороден и не свободен от дефектов.

Так как и неоднородность, и дефекты могут приводить к увеличению потерь энергии, «коэффициент внутреннего трения» зависит от совокупности этих причин и, следовательно, является статистической величиной.

К такому выводу пришел Гюнтер [21] после неудачных попыток измерить коэффициент внутреннего трения кварца.

Но с другой стороны, ни методика измерений Гюнтера, ни наша не дают ещё возможности экспериментально изучить коэффициент внутреннего трения настолько хорошо, чтобы можно было сделать окончательные выводы, так как измерение остающегося сопротивления кварца имеет погрешность того же порядка, что и сама измеряемая величина сопротивления. Исключения представляют пластинки, колеблющиеся по толщине, но там, как указывалось, имеются свои трудности.

Тем более невозможно разделить остающееся сопротивление на компоненты.

2. Мы попытались, хотя бы качественно, определить влияние дефектов различного типа на сопротивление кварца.

Все измерения, приведенные в данном параграфе, проводились с кварцами того же типа и тех же размеров, что и в § 7.

Предварительно были промерены 27 кварцев, в которых зрительным путём обнаружить дефекты не удавалось, но все кварцы были вырезаны из кристалла, обладавшего дефектами (табл. 7).

Затем были промерены 25 кварцев с видимыми дефектами разного типа (табл. 8).

Таблица 7

Остающееся сопротивление Ω	Число кварцев в % от общего числа
До 600	43
От 600 до 800	26
" 800 до 1000	15
выше 1000	11

Таблица 8

Остающееся сопротивление Ω	Число кварцев в % от общего числа
До 600	16
От 600 до 800	16
" 800 до 1000	20
" 1000 до 2000	24
выше 2000	24

Из этой таблицы видно, что отбраковка на основании внешнего осмотра действительно даёт эффект, но и в прошедших отбраковку кварцах (табл. 7) остающееся сопротивление колеблется в значительных пределах, и только половина кварцев имеет нормальную величину сопротивления.

Существенную роль играет род дефекта. Из 25 дефектных кварцев 7 имели внутренние трещинки и заколы. Их остающееся сопротивление оказалось: 24000, 12000, 10700, 8000, 4470, 530, 1100 Ω . Последние три кварца имели дефекты у концов, первые четыре — у середины бруска. Таким образом, расположение дефекта играет роль, что объясняется распределением деформаций, имеющих наибольшую величину в середине бруска.

Основным дефектом у остальных кварцев были пузырьки. При этом было установлено, что даже при наличии очень крупных пузырьков или весьма большого количества мелких пузырьков, распределённых по всему объёму кварца, остающееся сопротивление

ние в большинстве случаев не превышало нормальное. Поэтому наличие пузырьков вовсе не свидетельствует о низкой активности кварца.

Было обнаружено, что внутренние трещинки имеют своим началом пузырьки, и в этих случаях сопротивление кварца было значительно выше нормы. Можно предположить, что причиной этих трещин является вода, находящаяся в пузырьках; при высоких температурах кварц здесь может раскалываться под давлением паров воды на стенки пузырька. Поэтому, хотя сами пузырьки не увеличивают сопротивления, они являются одной из вероятных причин его увеличения.

3. В результате мы можем сделать следующие выводы:

1) повидимому, невозможно отделить потери энергии на внутреннее трение в кристалле от потерь в дефектных местах его; если внутреннее трение является результатом дефектов структуры кристалла, то путём тщательных измерений, вероятно, можно было бы установить разницу в коэффициентах потерь для кварцев из различных месторождений, если условия роста кристаллов здесь были различными;

2) измерения внутреннего трения всё же, повидимому, следует производить с пластинками, колеблющимися по толщине, имеющими достаточно большую поверхность при малой толщине;

3) основным дефектом, повышающим сопротивления кварцев, является трещинка внешняя (закол) или внутренняя;

4) весьма часто наличие дефектов типа пузырьков, видимых простым глазом, не повышает сопротивления кварцев;

5) существенным является распределение дефектов по объёму кварца; дефект сказывается на сопротивлении тем сильнее, чем больше деформация кристалла в месте его расположения.

9. ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЯ КВАРЦА

На основании материала, изложенного выше, мы можем составить полные расчётные формулы для сопротивления кварца.

1. Для брусков и пластинок типа рис. 2а и г, с никелевым покрытием граней и без учёта компоненты R_{qf} , мы получаем в омах:

а) брусок перпендикулярного среза (рис. 2г)

$$R_q = 7250 \frac{\Delta}{l_0} + (312\Delta + 7 \cdot 10^6 \delta_m) \frac{1}{l_0 l_m} + 800 \frac{\Delta}{l_0^2 l_m}; \quad (45)$$

б) пластинка СТ-среза (рис. 2г)

$$R_q = 10^4 \frac{\Delta}{l} + (815\Delta + 2 \cdot 10^7 \delta_m) \frac{1}{l^2} + 2200 \frac{\Delta}{l^3}. \quad (46)$$

Численные значения коэффициентов в этих формулах определены, исходя из данных эксперимента, приведенных в предыдущих параграфах и при значении B в формуле (5), равном 0,25. Так как эти

данные не по всем компонентам сопротивления могут быть признаны достаточными, коэффициенты в формулах также должны быть уточнены, для чего необходима постановка специальных измерений. Всё же погрешности расчётных формул в том виде, в каком они даны здесь, едва ли превысят $\pm 15\%$. Следует иметь в виду, что измеренное у реального кварца сопротивление может оказаться больше расчётного за счёт неучитываемой компоненты R_{gr} .

Рассматривая выражения (45) и (46), мы видим, что они принципиально отличаются от формулы (5), так как состоят из трёх слагаемых, причём каждое из них характерно своей функциональной зависимостью от размеров кварца. Отсюда очевидна ошибочность обобщения формулы (5).

Помимо возможности значительно точнее рассчитать сопротивление кварца, эти формулы позволяют также выбрать нужные соотношения между размерами кварца для получения заданного сопротивления. На рис. 23 приведены зависимости компонент и полного сопротивления квадратного кварца типа рис. 21, при толщине его 0,2 см и при никелевом покрытии толщиной 1,0 μ . Мы видим, что у кварцев больших размеров сопротивление определяется в основном компонентой R_{gr} , тогда как для кварцев малых размеров оно в такой же степени определяется компонентой R_{tm} .

Кружками обведены точки, соответствующие экспериментально определённым значениям полного сопротивления для трёх кварцев, применявшихся нами для измерения компоненты R_{gr} (см. табл. V). Компоненты R_{tm} и R_{gr} для этих кварцев были рассчитаны по данным эксперимента с брусками. Пунктирная кривая на рис. 23 изображает полное сопротивление кварца с учётом потерь в поверхностном слое больших граней. Она лежит выше кривой R_{gr} , полученной по формуле (46), где компонента R_{gr} рассчитана только для узких граней, и выше экспериментальных точек. Последнее обстоятельство может служить ещё одним подтверждением ранее высказанного предположения об отсутствии потерь в поверхностном слое кварца, когда он покрыт металлом.

Из кривых рис. 23 видно, что окончательно это предположение может быть обосновано опытами с кварцами малых размеров, при тонком металлическом покрытии и при работе в вакууме. Уточнение коэффициентов формул (45) и (46) безусловно должно быть произведено и тогда станет возможным, например, решение такой задачи, как окончательный контроль кварцев на отсутствие внутренних дефектов, приводящих к повышению их сопротивления.

Поскольку сопротивления кварцев, выражающиеся формулами (45) и (46), не включают компоненту R_{gr} , экспериментальная проверка результатов расчётов по этим формулам должна производиться только в игольчатом держателе и при правильном выборе точки зажатия. Конечно, должны быть приняты также меры к тщательному удалению грязи и влаги с поверхности граней измеряемого кварца.

Как было указано в параграфе 3, расчёт компоненты R_{gr} должен производиться с весьма большой осторожностью. Здесь кон-

струкция держателя решает успех такого расчёта. Эта конструкция должна быть предварительно изучена в отношении равномерности распределения усилий по контактирующей площади и в отношении силы сжатия кварца.

Когда эти характеристики держателя известны и могут регулироваться по желанию, расчёт R_{qr} по нашему мнению, не должен представить трудностей.

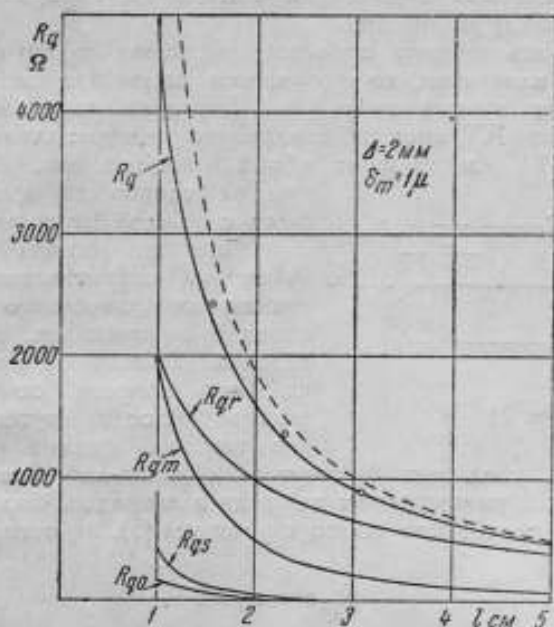


Рис. 23

2. Мы очень мало касались в нашей работе расчёта сопротивления кварцев косых срезов (АТ и ВТ). Это было сделано отчасти по причинам, указанным выше, отчасти же потому, что формула (5) при $B=0,25$ достаточно точно позволяет рассчитать R_q таких пластинок, что говорит о том, что здесь величины всех компонент, кроме R_{qo} и R_{qr} , малы и существенно не сказываются на расчётах. Однако, чтобы получить для этих типов кварцев хороший результат при помощи формулы (5), нужно учитывать два обстоятельства.

Одним из них является проверка кварца на отсутствие компоненты R_{qr} путём прогрева его и наблюдения за поведением сопротивления.

Второе обстоятельство касается эффективной площади электродов. В качестве примера приведём расчёт сопротивления для довольно часто встречающегося типа промышленного выполнения таких

кварцев. Разрез кварца, о котором идет речь, показан на рис. 24.

На этом рисунке показано распределение силовых линий электрического поля в кристалле. Мы видим, что части кварца между прорезами a в покрытии и его концами, не только не возбуждаются, но даже могут возбуждаться в противоположной фазе. В результате, как мы сейчас покажем, эффективная площадь электродов оказывается существенно меньшей, чем площадь, определённая через расстояние между прорезами.

Если менять ширину прорезов, расширяя их по направлению к середине пластинки, то получается изменение эквивалентного сопротивления, показанное на рис. 25. В этом опыте был использован кварц среза АТ, имевший следующие размеры: длина $x = 24$ мм, ширина $z' = 14$ мм, толщина $y' = 1,5$ мм (см. рис. 17). Расстояние от концов до края прорезов было с каждой стороны по 1,7 мм.

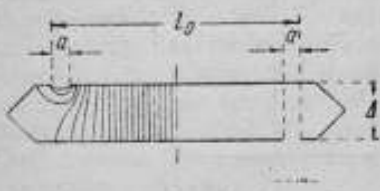


Рис. 24

Чтобы не вносить возможного изменения сопротивления за счёт снятия металлического слоя, последний не снимался, а лишь разрезался. Начиная от края первоначального прореза, от слоя отрезались полоски путём прорезки его тонкими щелями. Но, чтобы окончательно убедиться в отсутствии каких-либо изменений R_q , не связанных с уменьшением площади электродов, был произведен контрольный расчёт при помощи формулы (5), из которой следует, что

$$R_q s = \text{const.} \quad (47)$$

На рис. 25 также дана зависимость этого произведения от $\frac{a}{\Delta}$, полученная из данных эксперимента. Рассматривая графики рис. 25, мы видим, что $R_q s$ остаётся постоянным лишь после того, как отношение ширины прореза к толщине кварца достигнет значения 1,5. Следовательно, конфигурация поля у краёв металлического покрытия, только начиная с этой ширины прореза, остаётся неизменной, а, значит, формула (5) применима лишь при $\frac{a}{\Delta} \geq 1,5$.

Если прорез уже, чем $1,5 \Delta$, то сопротивление кварца будет больше (см. рис. 25), что эквивалентно уменьшению эффективной площади электродов. Например, при прорезах шириной 0,5 мм ($\frac{a}{\Delta} = 0,33$), эффективная площадь электродов может быть определена, если провести горизонтальную прямую db . Точке b соответствует $\frac{a}{\Delta} = 2,8$, т. е. $a = 4,2$ мм. Следовательно, для нашей пластинки эффективная площадь электродов будет составлять всего лишь 60% от площади, определяемой по расстоянию l_0 между про-

резами. Резкие изменения сопротивления, при изменениях в ширине прореза, если он мал, могут привести к большому разбросу результатов измерений, а потому соотношение $\frac{a}{\delta} \geq 1,5$ следует выдерживать.

Измерения показали, что с учётом указанного выше, для расчёта сопротивления пластин срезов АТ и ВТ, можно пользоваться формулой (5). Заметим, что, по нашим измерениям, коэффициент B должен быть несколько меньше 0,25.

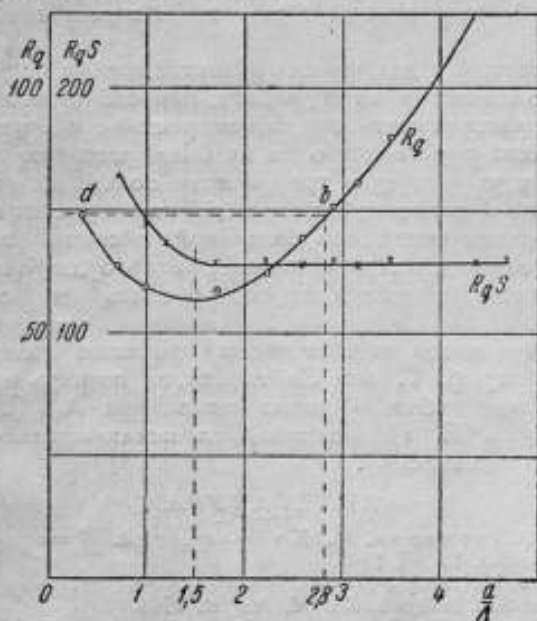


Рис. 25

3. В табл. 9 приводим результаты измерения сопротивления нескольких промышленных кварцев в держателях старого типа. Тип и размеры самих кварцев те же, что и у использованных нами для измерений в параграфах 7 и 8.

Таблица 9

Компоненты сопротивления		Ω	% от R_q
$R_{qv} + R_{qd}$	Дефекты кварца и внутреннее трение	100	0,6
R_{qs}	Поверхностный слой	500	3,0
R_{qm}	Металлическое покрытие	400	2,3
R_{qv}	Ультразвуковое излучение	3900	23,1
R_{qf}	Трение в держателе	12000	71,0
R_q	Полное сопротивление кварца в держателе	16900	100,0

19. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенный выше анализ эквивалентного сопротивления кварца отнюдь не претендует на исчерпывающую полноту. Наоборот, ряд исследований, например: трение в местах механического контакта, колеблющегося кварца и жесткой опоры, потери энергии в металлическом покрытии и в рыхлом поверхностном слое, — требует дальнейшего углубления и расширения.

Однако даже те результаты, которые получены нами, уже сейчас позволяют сделать заключение о том, что эта проблема, казавшаяся сложной, на самом деле может быть решена относительно просто.

Автор считает, что дальнейшее развитие предпринятых им исследований, изложенных в этой работе, приведет к возможности не только точно рассчитывать все характеристики кварцев, но, несомненно, поставит производство их на более высокую научную ступень, отвечающую растущим требованиям советской радиотехники.

Предполагая и далее работать в области изучения пьезокварца, как электромеханической колебательной системы, используемой в различных технических применениях, автор будет очень благодарен всем читателям, желающим прислать ему свои отзывы и пожелания.

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить благодарность проф. Г. А. Зейтленку, за помощь в постановке описанных выше работ, а также инженерам А. Я. Вайнбергу, В. А. Замину и Я. П. Беликову за исключительное внимание и помощь в их проведении.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Рмтов, А. Прозоров, М. Жаботинский. К теории стабилизации частоты. ЖЭТФ, 15, 10, 1945.
2. Crystal Quality. Electronics, March, 1945.
3. A Crystal Test Set. Bell lab. Record, August, 1944.
4. Mc-Natt. Test Set for Quartz Crystals. Electronics, April, 1945, p. 113.
5. Van Dyke. The standardization of Quartz Crystall Units, P I R E, January, 1945, p. 15.
6. W. Sady. Phys. Rev, 19, 1, 1922.
7. Viquieux. Quartz resonators and oscillators. London, 1931.
8. Van Dyke. The Piezo-electric Resonator and its Equivalent Network, P I R E 16, 742, 1928.
9. Beechmann. Telefunken, N 76, 1937.
10. Mason. Bel Syst. T J, July, 1934.
11. Шубинков. Кварц и его применения, изд. АН СССР, 1940.
12. S. Hightand G. Willard, P I R E, 225, 1937.
13. Van Dyke. P I R E, 4, 386, 1935.
14. Чудаков. Доклады конференции по трению АН СССР, т. I, 1939, стр. 462.
15. J. Rankin. Phil. Mag., VIII, 1926, 806.
16. G. Tomlinson. Phil. Mag., 7, 1929, 905.
17. С. Хайкин и др. Труды конф. по трению АН СССР, т. I, 1938, стр. 468.
18. J. Hubbard. Phys. Rev., 38, 1931, 1011.
19. А. Гутин. ЖТФ, 7, 10, 1937, 1096.
20. G. Gockel. Phys. Z-ty, 18, 1936, 657.
21. Günter. E N T, № 2, 1939, и. 53.
22. S. Quimby. Phys. Rev, 25, 11, 1925, 558.
23. А. Харисевич. Теория электроакустических аппаратов. Связьиздат, 1940.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр
1. Компоненты эквивалентного активного сопротивления кварца	4
2. О методике измерений	8
3. Сопротивление, вносимое механическим контактом колеблющегося кварца с жесткой опорой	11
4. Сопротивление, вносимое излучением ультразвуковых волн	26
5. Сопротивление, вносимое связанными колебаниями кварца	36
6. Сопротивление, вносимое нанесенным на грани кварца металлическим слоем	40
7. Сопротивление, вносимое потерями энергии в поверхностном слое кварца	43
8. Сопротивление, обусловленное внутренним трением и дефектами кристалла кварца	49
9. Формулы для расчета сопротивления кварца	51
10. Заключение	56
11. Литература	—

Цена 4 руб.

Библиотека имени К. Маркса

Склад изданий:
Ленинград, Международный пр. 19. ВНИИМ

