

А. А. СОЛОВЬЕВ, С. И. ГРИБКОВА

О ВЛИЯНИИ НЕОДНОРОДНОСТИ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ИЗМЕРЕНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В ЖИДКОСТЯХ

Приведены результаты исследования ультразвуковых полей пьезокварцевых пластин в зоне Френеля. Обсуждается вопрос о возможной оценке однородности излучения. Излагаются результаты измерения коэффициента поглощения ультразвука в неоднородных акустических полях оптическим методом. Оценивается влияние лучевой структуры поля на измерения акустического поглощения в жидкостях.

Известно, что неоднородность ультразвуковых полей может быть источником ошибок [1]. Оценка искажений, вносимых в измерения, сводится к установлению соотношения поперечных размеров излучателя и длины ультразвуковой волны [2, 3]. Экспериментальная проверка поправочных формул не всегда дает соответствие с расчетами [4], в особенности при измерениях в области зоны Френеля. Описания акустических полей в пределах зоны Френеля приводятся у С. Н. Ржевкина [5] и Р. Бэра [6]. Ими показано, что структуру акустического поля можно рассматривать как результат дифракции звука на излучающей дифракционной решетке. Представляет интерес установить возможность применения указанных соображений к оценке неоднородности акустического поля.

В наших исследованиях для наблюдения полей использовался теневой прибор ИАБ-451. Ультразвуковые поля различной степени неоднородности создавались в толуоле, цикло-гексане, н-гексане, воде и бензоле. Наблюдения были сделаны с пьезопластинками в основном круглой форме.

Неоднородность всех наблюдаемых нами акустических полей имеет две характерные особенности: макронеоднородность в виде ярких «столбов», нормальных к поверхности излучателя, и микронеоднородность в виде косого излучения, состоящего из тонких лучей. Неоднородный характер излучения наблюдался при всех использованных нами способах крепления. Были рассмотрены акустические поля для кварцевых пластинок, нагруженных в центре, закрепленных по периметру, прижатых пружинным контактом к акустической линии задержки и закрепленных в трех точках к торцов. Из всех перечисленных держателей лишь последний позволял устранять до некоторой степени неоднородность. Вращением кварца в торцевых зажимах вокруг своей оси

удавалось найти такие точки, при закреплении пластинки, в которых нитевидная структура поля пропадала (рис. 1). Креплением пластинки в определенных точках мы добивались частичного гашения поперечных колебаний кварца для некоторых направлений. Полностью устранить неоднородность излучения не удается. Держатель в трех точках позволял управлять распределением излучения в нормальном и боковом направлении, а также регулировать степень порядка нитевидной структуры поля.

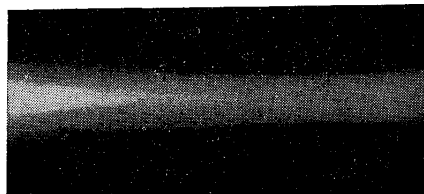


Рис. 1. Акустическое поле в толуоле, частота $\nu=6,02$ мГц, излучатель закреплен в трех точках с торцов

Многочисленные наблюдения убеждают в том, что полностью идентичных полей нет. Для количественных описаний следует выбрать типичный образец неоднородного поля. Можно, например, взять поле от дифракции на решетке Хладни с постоянной, равной длине изгибной волны. Оно отличается от реального, но вместе с тем достаточно подробно передает все признаки сильно неоднородного поля. Воспользуемся условием дифракции и оценим постоянную решетки Хладни. Наблюдения лучистой структуры показывают, что наиболее интенсивны параллельные лучи под некоторым углом φ к нормали поверхности кварца. Эти лучи идут по биссектрисе угла между нормалью и направлением дифракционного луча [5]. В таблице 1 приведены результаты измерения угла φ в пяти жидкостях.

Таблица 1

Жидкость	φ , градусы	Длина акустической волны (λ), мм	Постоянная решетки, мм	Граница зоны осцилляций, мм		$\frac{R^2}{\lambda}$, мм
				измерения	расчет	
Вода	13,4	0,258	0,561	43	46	395
Бензон	11,8	0,224	0,559	49	52	446
Циклогексан	11,3	0,216	0,562	51	54	464
Ацетон	10,7	0,202	0,554	54	58	495
n-гексан	9,6	0,184	0,559	60	64	543

По измеренным углам дифракции была вычислена постоянная решетки λ_1 . В пределах ошибок измерений значения λ_1 в разных жидкостях оказались одинаковыми. Теоретический расчет длины изгибной волны в кварцевой пластине дает значение 0,865 мм. Расхождение, по видимому, связано с тем, что волновые движения в плоскости пластинки сильно усложняются и волну нельзя считать чисто изгибной. Вместе с тем это не может послужить препятствием к использованию вычисляемой из измерений величины λ_1 для характеристики поля излучателя. Оценим с ее помощью зону неоднородности.

Из геометрических соображений ясно, что акустическое поле становится свободным от резких осцилляций амплитуды ультразвука, начиная с расстояний, равных $x_0 = \frac{R}{\sin \varphi}$; или, учитывая условие дифракции, можно записать

$$x_0 = \frac{R}{\sqrt{\frac{1}{2}(1-\beta)}}, \quad (1)$$

где $\beta = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_1}\right)^2}$, λ — длина волны ультразвука в данной среде, λ_1 — постоянная излучающей дифракционной решетки, R — радиус излучателя.

Для оценки граничных расстояний зоны осциллирующий были проведены измерения коэффициента поглощения ультразвука на разных расстояниях от излучателя. На рис. 2 представлен результат такого измерения в циклогексане на частоте 5,38 мГц. Юеним расстояние x_0 , начиная с которого коэффициент поглощения практически постоянен. В качестве постоянной излучающей решетки в формуле (1) возьмем длину поперечной волны λ_t . Для циклогексана ее значение 54 мм. Нетрудно видеть, что данные расчета совпадают с результатами измерений. Подобные юенки были сделаны еще для четырех жидкостей (см. табл. 1).

Сравнение позволяет заключить, что параметр $\frac{\lambda}{\lambda_t}$ оказывается подходящим для оценки тех расстояний, начиная с которых значения измеряемого коэффициента поглощения не искажаются.

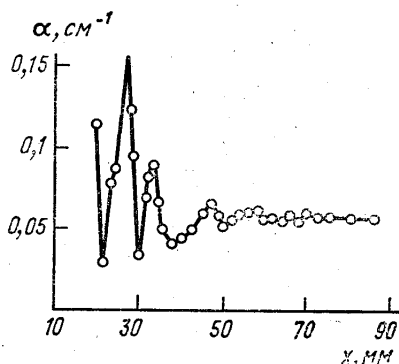


Рис. 2. Зависимость коэффициента поглощения ультразвука от расстояния до излучателя в циклогексане ($\nu = 5,38$ мГц).

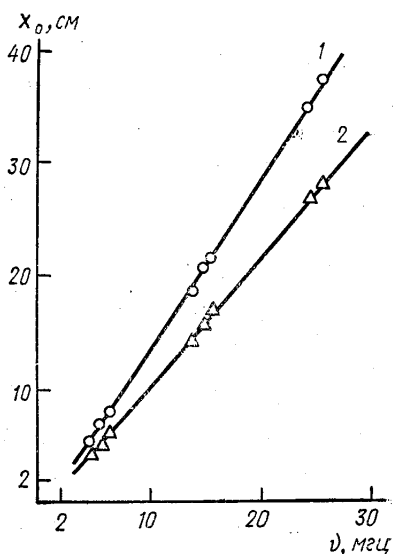


Рис. 3. Зависимость от частоты граничных расстояний зоны неоднородности: 1 — *n*-гексан, 2 — вода.

Для выяснения поведения неоднородности с частотой наблюдались акустические поля как на собственной частоте излучателей, так и на гармониках. Было установлено, что с увеличением частоты зона неоднородности простирается на очень большие расстояния. При этом угол наклона, толщина и интенсивность тонких ультразвуковых лучей сильно уменьшаются. Неоднородное распределение амплитуд на поверхности излучателя все же остается. Наблюдения показывают наиболее резкий характер неоднородности на частотах, близких к собственной частоте излучателя. Возбуждение на гармониках дает акустические поля с маленьким углом отклонения лучей от нормали.

Результаты количественных измерений зоны неоднородности от частоты представлены на рис. 3. Характер изменения расстояний x_0 с частотой может определяться постоянной излучающей решетки на поверхности излучателя. Примем зависимость величины x_0 с частотой линейной. Будем считать, что на низких частотах, значительно меньших собственной частоты ν_0 , угол наклона дифракционных лучей увеличивается и стремится в пределе к 90° . При частоте излучения ν , равной собственной частоте излучателя ν_0 , угол наклона лучей к нормали определяется отношением длины волны ультразвука в среде к длине поперечной волны λ_t в излучателе. Тогда для граничных расстояний x_0 запишем

$$x_0 = R\sqrt{2} \left[\frac{\nu}{\nu_0} (1 + k) - 1 \right], \quad (2)$$

где $k = \sqrt{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{c}{c_t}\right)^2}}$, c — скорость звука в среде, c_t — скорость поперечных волн в излучателе, R — радиус излучателя.

Расчет коэффициента k дает для воды значение 0,307, а для н-гексана 0,221. Результаты подсчета расстояний x_0 по формуле (2) для воды и н-гексана представлены сплошными линиями на рис. 3.

Сравнение с данными измерений позволяет заключить, что принятые представления могут быть использованы для оценки границы зоны осцилляций амплитуды при различных частотах излучателя.

Таблица 2

Жидкость	Частота, мГц	φ, градусы	Коэффициент поглощения, см ⁻¹		
			способ усреднения	вдоль отдельных лучей	другие методы [7]
н-гексан	6,00	9,8	0,021	0,020	0,020
М-ксилол	8,22	11,6	0,050	0,051	0,053
Толуол	6,02	11,1	0,0296	0,0295	0,0297
Циклогексан	5,14	12,0	0,052	0,050	0,052
Бензол	5,19	10,9	0,223	0,220	0,222

Область расстояний от излучателя, близких к значениям x_0 , является наиболее распространенной в практических измерениях. Особенно это относится к оптическому методу. Эти расстояния значительно меньше расстояний $(2 \div 5) \frac{R^2}{\lambda}$ (см. табл. 1), для которых обычно вычисляются поправки на измерения коэффициента поглощения ультразвука [3, 4]. Сложный интерференционный характер ультразвукового поля приводит к тому, что изменение амплитуды звука для различных точек излучателя идет неодинаково. Чтобы устранить влияние случайных отклонений, на кривой изменения интенсивности ультразвука с расстоянием в области $x < x_0$ мы ввели осреднение функций $S(y)$. Эти функции определяли зависимость логарифма интенсивности ультразвука от поперечного направления акустического поля y при различных расстояниях от излучателя. Если функция $S(y)$ задана на интервале (y_1, y_2) , то коэффициент поглощения α можно вычислять с помощью среднеквадратичного усреднения:

$$\alpha = \frac{1}{2\Delta x} \sqrt{\int_{y_1}^{y_2} S^2(y) dy}. \quad (3)$$

Способом квадратичного усреднения были обработаны акустические поля в пяти жидкостях. Результаты измерений представлены в таблице 2. Сравнение с результатами измерений другими методами показывает хорошее совпадение.

Возможная ошибка за счет усреднения может быть связана с наличием лучей, идущих под некоторым углом к нормальному распространению. Максимальное значение ошибки определяется косинусом угла наклона лучей к нормали. Для относительных отклонений, измеряемых α_0 значений коэффициента поглощения от истинных значений α , имеем

$$\frac{\alpha_0 - \alpha}{\alpha_0} = 1 - \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_1} \right)^2} \right)}. \quad (4)$$

В акустических полях сильной неоднородности величина $\frac{\alpha_0 - \alpha}{\alpha_0}$ не превышает 3%. В точных измерениях эту ошибку, несомненно, нельзя оставлять без внимания.

О возможности использования метода усреднения свидетельствуют и результаты измерения коэффициента поглощения вдоль тонких лучей. В таблице 2 приведены результаты таких измерений.

Авторы выражают благодарность проф. А. С. Предводителеву за внимание к данной работе, ценные указания и советы при ее выполнении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Краснушкин П. Е. «Уч. зап. МГУ», физика, 74, 73, 1944.
2. Krasnushkin P. E. Acustika, 20, 343, 1968.
3. Seci H., Granato A., Truell P. J. Acoust. Soc. Amer., 28, 230, 1956.
4. Bass R. J. Acoust. Soc. Amer., 30, 602, 1958.
5. Ржевкин С. Н. ДАН СССР, 16, 275, 1937.
6. Ваг R. Phys. Acta., 9, 617, 1936.
7. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. М., ИЛ, 1956.

Поступила в редакцию
10.6 1970 г.

Кафедра
молекулярной физики