- Кадомцев Б. Б., Петвиашвили В. И. Слаботурбулентная плазма в магнитном поле. ЖЭТФ, 1962, 43, с. 2234—2244.
 Кадомцев Б. Б. Турбулентность плазмы. В кн.: Вопросы теории плазмы.

- Кадом цев Б. Б. туроулентность плазмы.— Б кн.: Бопросы теории плазмы. Т. 4. М., 1964, с. 188—339.
 Закатов Л. П. и др. Получение релятивистской плазмы адиабатическим сжатием в системе плазма пучок.— Письма в ЖЭТФ, 1972, 15, вып. 1, с. 16—20.
 Кузьменков Л. С. Цепочка уравнений Боголюбова для релятивистских систем. Радиационное затухание волн в плазме.— ДАН СССР, 1978, 241, № 2, с. 200, 202 c. 322-325.
- 5. Цытович В. Н. Нелинейные эффекты в плазмс. М., 1967, с. 182-213.
- 6. Кузьменков Л. С., Поляков П. А. Кинетическая теория волн в релятивистской плазме с учетом торможения излучением.— Вестн. Моск. ун-та. Физ., астрон., 1978, 19, № 3, с. 95—100. 7. Ахиезер А. И., Ахиезер И. А., Половин Р. В., Ситенко А. Г., Сте-
- панов К. Н. Электродинамика плазмы. М., 1974, с. 479-517.

Поступила в редакцию 08.02.80

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1980, Т. 21, № 6

УДК 534.12

Н. Н. МАКАРЧЕНКО, Ф. В. РОЖИН, О. С. ТОНАКАНОВ

ФОКУСИРОВКА ЗВУКА ЖИДКОЙ СФЕРОЙ

Возможность концентрации звуковой энергии в водной среде жидкой сферой с отличными от воды параметрами показана экспериментально в работе [1] и теоретически в работе [2]. Исходя из точного решения волнового уравнения, в [2] рассчитаны поля давления и интенсивности на оси сферы во внутренней области и зависимость от угла падения плоской волны звукового давления в фокусе в интервале $1 \leq d/\lambda \leq 15$ (d — диаметр сферы, λ — длина волны в воде) для трех вариантов параметров жидкости внутри сферы. Фокусирующие свойства акустических линз с заданным законом изменения коэффициента преломления по радиусу сферы (линзы Люнеберга) исследованы в [3, 4, 5, 6]. Сравнение характеристик сферической линзы Люнеберга и простой сферической линзы показало, что последняя имеет большее усиление и лучшую направленность при некоторых kr_0 ($k=2\pi/\lambda$, r_0 радиус сферы). В связи с этим в данной работе проводится более детальное исследование поля дифракции на жидкой сфере.

Как известно [7], определение поля давления при дифракции плоской звуковой волны на жидкой сфере сводится к решению краевой задачи для волнового уравнения со следующими граничными условиями

$$(p_i + p_s)|_{r=r_0} = \overline{p}|_{r=r_0}, \ (q_{in} + q_{sn})|_{r=r_0} = \overline{q}_n|_{r=r_0},$$

где p_i, p_s — давления соответственно в падающей и рассеянной волне, \overline{p} — давление по внутренней среде, а q_{in} , q_{sn} и $\overline{q_n}$ — соответствующие им нормальные компоненты скоростей. Выражения для р и р описывают звуковое давление в любой точке пространства в присутствии жидкой сферы и представляют собой функции волновых параметров kr, kr_0 , kr_0 и отношения волновых сопротивлений материала сферы и среды $R = \rho c / \rho c$, где ρ , $c(\rho, c)$ — плотность и скорость звука вне (внутри)

сферы. Вычисления радиальных и угловых зависимостей ближнего поля дифракции на жидкой сфере проводилось на ЭВМ БЭСМ-6 для значений параметра kr_0 в интервале $5\pi \leq kr_0 \leq 10\pi$ в случае равных плотностей материала сферы и среды при изменении показателя преломления *n* в интервале $1 \leq n \leq 2$ (n = c/c). Поглощение в материале



Рис. 1. Поле внутри сферы на оси: a - n = 2; $kr_0 = 19,32$ (1); 26,45 (2) н 29,43 (3); 6 - n = 2 (1); 1,8 (2); $kr_0 = 18$; s - n = 1,6 (1) н 1,4 (2); $kr_0 = 18$

сферы и в среде не учитывалось. Специальные функции определялись из рекуррентных соотношений [8]. Точность вычисления сферических функций Бесселя и Неймана задавалась равной 10-7.

Примеры распределения звукового давления на оси во внутренней области между центром сферы и задней (теневой) ее поверхностью при n=2 показаны на рис. 1, а. В области, прилегающей к поверх-

ности, амплитуда давления существенно больше амплитуды в падающей волне p_0 и имеет осциллирующий характер. Причем один из максимумов находится вблизи поверхности. Размеры этой области фокусировки увеличиваются с ростом kr_0 , число максимумов также растет.

Поле за сферой монотонно убывает при удалении от поверхности. Монотонное убывание поля за сферой не сохраняется при n < 2. С уменьшением показателя преломления до n = 1,4при фиксированном значении kro pasмеры области фокусировки уменьшаются и наибольший из максимумов поверхности смешается сферы \mathbf{K} (рис. 1, б, в). При n=1,4 наибольший из максимумов находится на поверхности, а при n < 1,4 он смещается во внешнюю область. При дальнейшем уменьшении *п* максимум удаляется от поверхности и становится все более по мере уменьшения $n \supset 0$ размытым (рис. 2). Амплитуда звукового давления в главном максимуме является функцией показателя преломления:







Рис. 3. Угловое распределение поля на поверхности сферы: *а* — при *kr*₀=26,45 и *n*=2; *б* — при *kr*₀=30 и *n*=1,8 (1), 1,6 (2) и 1,4 (3)

она увеличивается с ростом показателя преломления до $n \approx 1,8$, а затем уменьшается.

Зависимость звукового давления в точке на поверхности сферы от угла падения волны имеет резкий максимум на теневой стороне сферы при $\theta = \pi$ (рис. 3). Полная ширина главного максимума по уровню — ЗдБ не более 10° при n=2 и $5\pi \leqslant kr_0 \leqslant 10\pi$ и уменьшается с увеличением kr_0 . Отношение амплитуды главного максимума к наибольшему

из боковых в среднем порядка 20дБ, причем наибольший из боковых максимумов находится в освещенной зоне. С уменьшением показателя преломления происходит изменение угловых зависимостей звукового давления. Отмечается значительное уменьшение главного максимума при $n \approx 1.4$, а также рост амплитуды боковых максимумов вблизи от главного. Расчеты показывают, что амплитуда максимумов в освещенной зоне при этом уменьщается и их роль оказывается несущественной.

Следует отметить, что при определенных значениях kr_0 возможно резонансное возбуждение собственных колебаний жидкой сферы, на что в работе [2] внимание не обрашено. Не останавливаясь на этом подробно, укажем, что при резонансах нарушается как угловое, так и радиальное распределение звукового поля. Все приведенные данные относятся к нерезонансным областям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- I. Toulis W. J. Acoustic focusing with spherical structures.-JASA, 1965, 35, N 3, p. 286-292.
- 2. Boyles C. A. Theory of focusing plane waves by spherical liquid lenses -- JASA, 1965, 38, N 3, p. 393-405.
- 3. Boyles C. A. Wave theory of an acoustic Luneburg lens.— JASA, 1968, 43, N 4, p. 709-715.

- р. 709-715.
 4. Boyles C. A. Radiation characteristics of spherically symmetryc, perfect focusing acoustic lenses. JASA, 1969, 45, N 2, p. 351-355.
 5. Boyles C. A. Wave theory of an acoustic Luneburg lens. II. The theory of variable density lenses. JASA, 1969, 45, N 2, p. 356-364.
 6. Boyles C. A. Theory of the spherical, compliant-tube Luneburg lens. JASA, 1977, 61, N 2, p. 338-352.
 7. Ржевкин С. Н. Курс лекций по теории звука. М., 1960, с. 257-286.
 8. Нигул V. К. Метсаварар Я. А. Векслер Н. Л. Кутсер М. Э. Эхосит.
- 8. Нигул У. К., Метсавээр Я. А., Векслер Н. Д., Кутсер М. Э. Эхо-сиг-налы от упругих объектов. Таллин, 1974, Т. 2. с. 31.

Поступила в редакцию 27.03.80

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1980, Т. 21, № 6

УДК 539.1

В. А. МАШТАКОВА, Б. Б. ШИШКИН

ТОНКАЯ СТРУКТУРА СПЕКТРОВ РЕКОМБИНАЦИОННОЙ ЭМИССИИ

1°. Представления о тепловых дефектах (ТД) как о локализованных объектах в переходных металлах справедливы, по всей видимости, только до температур Т ~ $\Theta_{r_{2}}$; $\Theta_{r_{2}}$ - характеристическая термоэмиссионная температура [1]. При Т>Өтэ в металлах может происходить рекомбинация ТД. Оценка, проведенная в работе [1], показывает, что освобождающаяся в этом процессе энергия Q достаточна для образования в электронной жидкости металлов элементарных возбуждений на уровни, превышающие уровень вакуума. Результат этого процесса — наблюдаемый на опыте ток рекомбинационной эмиссии [1].

Для исследования энергетического спектра носителей этого тока использован метод задерживающего электростатического поля [2]. Техника эксперимента описана в работе [1]. Опыты проводились с различными кристаллографическими плоскостями (гранями) монокристаллов вольфрама и молибдена.