ОДЕССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
им. И. И. Мечникова

На правах рукописи

Звелиндовский Андрей Викторович

ТЕПЛОВЫЕ ФЛУКТУАЦИИ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

01.04.02 - теоретическая физика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Одесса - 1992

Работа выполнена на кафедре теоретической физики Одесского государственного университета им.И.И.Мечникова

Научный руководитель: доктор физ.-мат.наук, доцент
Затовский А.В.

Официальные оппоненты:
доктор физ.-мат.наук, вед.научн.сотр. Дзюблик А.Я.
доктор физ.-мат.наук, профессор Контуш С.М.

Ведущая организация - Киевский университет им.Т.Шевченко

Защита состоится "22 ЯНВ 1993 года в 14.00 часов на заседании специализированного совета К 068.24.11 при Одесском государственном университете им .И.И.Мечникова (270100,г.Одесса,ул.Петра Великого, 2, ОГУ)

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Одесского университета (ул.Преображенская, 24)

Автореферат разослан "21 ДЕК 1992 года

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор физ.-мат.наук, доцент Ткаченко И.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Разнообразные дисперсные системы: микроэмульсии, растворы мицелл, везикул, биомакромолекул - являются предметом постоянного интереса благодаря большому числу различных применений. Изучение теплового движения молекул в таких объектах, обладающего особенностями по сравнению с неограниченными системами, является необходимым при анализе широкого круга физических явлений. Эти молекулярные движения проявляются в различного рода спектроскопических экспериментах: рассеянии и поглощении электромагнитного излучения и медленных нейтронов, диэлектрической релаксации и проч. Теоретическое описание во всех случаях требует изучения корреляционных функций молекулярных переменных. Точный расчет этих функций в настоящее время затруднителен, что объясняется сложностью описания систем многих частиц, взаимодействующих между собой. Для неоднородных систем такая задача представляется особенно сложной - молекула жидкости эмульсионной капли или мицеллы перемещается вместе с частицей и, кроме того, участвует во внутренних движениях, спектр которых чувствителен к форме поверхности частицы и тепловым движениям ее окружения. Анализ опытных данных поэтому чаще всего основывается на модельных представлениях.

Методы компьютерного моделирования теплового молекулярного движения жидкостей подтвердили существовавшее представление об его коллективности и установили применимость обычной гидродинамики в области времен, соответствующих примерно десяти столкновениям на частицу, и на расстояниях порядка нескольких их диаметров. Коллективный характер движений обнаруживается молекулярно-динамическими расчетами и в глобулярных белках, атомы которых кроме колебаний вблизи средних равновесных положений участвуют в перемещениях групп атомов, подобных движению молекул растворенного вещества в жидкости.

Таким образом, представляется актуальным развитие теории коллективных тепловых флуктуаций дисперсных систем, основанной на гидродинамическом описании.

Целью работы явилось:

- изучение гидродинамических флуктуаций сферически ограниченной вязкой сжимаемой жидкости;
- феноменологическое моделирование в рамках гидродинамического подхода коллективных возбуждений слабых растворов сферических капель, мицелл и везикул;
- изучение корреляционных функций динамических переменных дисперсных систем и построение на их основе спектров поглощения и рассеяния излучения;
- исследование влияния внешнего акустического поля на внутренние движения малых упругих сфер и изменения параметров и формы спектра резонансного поглощении гамма-квантов.

Научная новизна и практическая ценность.

В работе заложены основы теории тепловых флуктуаций ограниченных жидкостей. Впервые в наиболее общем виде построена корреляционная теория равновесных тепловых флуктуаций слабых растворов сферических мицелл и везикул, моделируемых вязкой сжимаемой жидкостью.

Детально исследовано влияние на динамику низкочастотных коллективных возбуждений микроэмульсий феноменологических параметров, характеризующих объемное и поверхностно-активное вещество.

Полученные результаты использованы для интерпретации экспериментальных данных по изменению формы спектров мессбауэровского поглощения жидкостью в биологических мембранах и сферических порах и по спаду амплитуды нейтронного спинового эха на микроэмульсии.

Проведено изучение акустической модуляции резонансного поглощения гамма-квантов неоднородным образцом - упругой матрицей с малыми сферическими вкраплениями. Обнаружена возможность использования акустической модуляции для прецизионного определения упругих характеристик вкраплений.

Автор защищает:

- Результаты теоретического расчета и анализа частотной и временной зависимостей корреляционных функций поля скорости и плотности вязкой сжимаемой жидкости, ограниченной сферической поверхностью;

- Моделирование и анализ спектральных свойств коллективных возбуждений растворов мицелл и везикул;
- Метод построения модулированных внешним звуковым полем спектров мессбауэровского поглощения неоднородными образцами со сферическими вкраплениями.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на VIII международной конференции "Свойства жидкостей в тонких слоях" (Киев,1990), региональной конференции молодых ученых "Физика конденсированного состояния" (Львов,1990), VIII Всесоюзном симпозиуме по межмолекулярным взаимодействиям и конформациям молекул (Новосибирск,1990), IX совещании "Структура и динамика молекул и молекулярных систем" (Черноголовка,1992), на семинарах кафедры теоретической физики ОГУ.

Результаты диссертации опубликованы в 11 печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертация, общим объемом 130 страниц машинописного текста, состоит из введения, четырех глав, приложения, заключения и содержит 21 рисунок. Список литературы включает 160 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы, сформулирована цель работы и приведено ее краткое содержание.

Первая глава посвящена обзору основных теоретических и экспериментальных работ по теме диссертации. Проанализированы сведения по равновесным и динамическим свойствам ограниченных конденсированных систем, по влиянию поверхности на свойства жидкостей в граничных слоях и порах. Кроме изменения интегральных характеристик в ограниченных жидких системах наблюдается и пространственная неоднородность, что обнаружено в численных экспериментах. Однако, при увеличении размеров пор пространственная неоднородность существенна лишь на расстояниях нескольких молекулярных диаметров от границы. Эти и другие данные позволяют надеяться, что для не слишком малых ограниченных систем применение континуальных (макроскопических) подходов может привести к реалистичным результатам. Такие подходы получили распространение, например, при модельном описании динамических и электростатических свойств глобулярных белков, при построении термодинамики малых частиц, интерпретации экспериментов по светорассеянию взвесями биологических клеток.

Тепловые флуктуации в эмульсиях, растворах мицелл и везикул существенно сказываются на результатах многих спектроскопических экспериментов. Низкочастотные тепловые возбуждения микроэмульсий можно описать феноменологически, моделируя их слабыми растворами мелких капель в среде растворителя. В имеющихся публикациях изучались законы дисперсии возбуждений, связанные с релаксацией формы поверхности к равновесной или капиллярные возбуждения везикул. При этом основное внимание уделялось мицеллам, которые моделируются несжимаемой жидкостью, и изучались спектральные свойства параметров, тесно привязанных к флуктуациям отклонения формы от сферической. По этой причине спектр флуктуаций плотности мицеллы определялся лишь приближенно по спектру флуктуаций поверхности.

Проведен также анализ работ по акустической модуляции мессбауэровских спектров, явлению хорошо изученному в настоящее время теоретически и экспериментально для однородных образцов.

В первом параграфе второй главы изучены спектры билинейных гидродинамических полей в сферической полости радиуса R. Жидкость считается сжимаемой и описывается содержащими спонтанные напряжения и потоки тепла линеаризованными уравнениями Навье-Стокса с постоянными кинетическими и термодинамическими коэффициентами. Флуктуирующая плотность представляется в виде разложения по сферическим функциям от углов и сферическим функциям Бесселя, а скорость - в виде разложений по собственным функциям векторного уравнения Гельмгольца

$$\delta\rho(\vec{r},t) = \sum_{\lambda} w_{\lambda}(t)\, j_{n}(k_{\lambda}r)\, Y_{mn}(\vartheta,\varphi) ,$$
$$\vec{v}(\vec{r},t) = \sum_{a,\lambda} u^{a}_{\lambda}(t)\, \vec{a}_{\lambda}(\vec{r}) , \qquad a = M,N,L . \tag{1}$$

Случайная сила в уравнении Навье-Стокса раскладывается аналогично. В качестве граничного условия выбрано условие прилипания, из которого следуют содержащие бесселевы функции трансцендентные уравнения для собственных значений краевой задачи

$$j_n(k_\lambda R) = 0 \quad (\text{для } a{=}M), \qquad j_{n-1}(k_\lambda r) = 0 \quad (\text{для } a{=}L,N). \qquad (2)$$

Индекс λ является собирательным, обозначающим набор трех чисел m, n и номера корня из (2). Спектральные плотности флуктуаций находятся после перехода в гидродинамических уравнениях к Фурье-представлению всех величин по времени и применения флуктуационно-диссипативной теоремы (ФДТ). Результаты учитывают флуктуации температуры и отличаются от случая неограниченной жидкости дискретным характером волновых чисел, определяемых из граничных условий (2)

$$\langle\vec{v}(\vec{r},t)\,\vec{v}(\vec{r}\,',t')\rangle_\omega = \sum_{a,\lambda}\langle u_\lambda^a u_\lambda^{a*}\rangle_\omega\,\vec{a}_\lambda(\vec{r})\vec{a}_\lambda^{\,*}(\vec{r}\,'),$$

$$\langle u_\lambda^b u_\lambda^{b*}\rangle_\omega = \mathrm{Re}\frac{\kappa T\delta_{\lambda\lambda'}}{\pi\rho(-i\omega+\nu k_\lambda^2)\Lambda_\lambda^b}, \qquad b{=}M,N, \qquad (3)$$

$$\langle u_\lambda^L u_\lambda^{L*}\rangle_\omega = \mathrm{Re}\frac{\kappa T A_\lambda}{\pi\rho\Lambda_\lambda^L}\delta_{\lambda\lambda'}, \qquad \Lambda_\lambda^a = \int d\vec{r}\;\vec{a}_\lambda^{\,2}(\vec{r}),$$

$$A_\lambda^{-1} = \omega^2 + i\omega k_\lambda^2(\zeta+\tfrac{4}{3}\eta)/\rho - c^2k_\lambda^2 - i\omega B_\lambda\left(\frac{\partial s}{\partial\rho}\right)_T,$$

$$B_\lambda = \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_\rho Tk_\lambda^2\left[c_v(-i\omega + k_\lambda^2\chi)\right]^{-1}.$$

Здесь χ - температуропроводность, s - энтропия единицы массы жидкости, c - адиабатическая скорость звука, p - давление, η, ζ, ν - объемная, сдвиговая и кинематическая вязкости. Угловыми скобками обозначено усреднение по реализациям случайных полей. С учетом выражения для корреляционной функции (КФ) плотности, найден динамический структурный фактор (ДСФ) жидкости в полости

$$S(\vec{k},\omega) = \langle\delta\rho_{\vec{k}}(t)\delta\rho_{-\vec{k}}(0)\rangle_\omega, \qquad \delta\rho_{\vec{k}} = \int_V \delta\rho(\vec{r},t)\exp(i\vec{k}\vec{r})\,d\vec{r}, \qquad (4)$$

$$S(\vec{k},\omega) = \frac{4\pi R\rho}{\omega^2}\sum_{n,l}\frac{(2n+1)\langle|u_{nl}^L|^2\rangle_\omega}{\frac{1}{2}-(n+1)\cdot(k_{nl}R)^{-2}}\,\frac{k_{nl}^2\,k^2}{(k_{nl}^2-k^2)^2}\,j_{n-1}^2(kR). \qquad (5)$$

ДСФ имеет максимум на нулевой частоте и при определенном соотношении вязкости и размера полости - сдвинутый относительно нуля. Для маловязких жидкостей смещенный максимум (линия Бриллюэна) проявляется для пор практически любого размера (см. Рис.1). Графически представлен частотный спектр автокорреляционной функции (АКФ) продольной компоненты скорости и ДСФ (5) для различных значений волнового вектора передачи k, вязкости жидкости и размера полости.

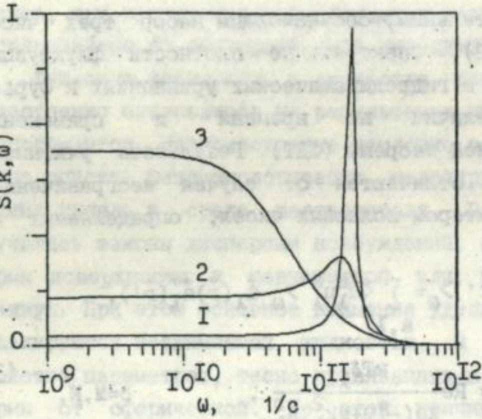

Рис. 1. Динамический структурный фактор жидкости в полости радиусом 400 Å для различных вязкостей η = 0.001 (1), 0.005 (2), 0.02 (3) кг/(м·с), kR=0.5.

В § 2.2 выписаны во временном представлении выражения для АКФ скорости как нерелаксирующей жидкости, так и с учетом максвелловской релаксации вязкости. Ранее в экспериментах по численному моделированию жидкостей в тонких пленках было обнаружено, что АКФ скорости, соответствующая движению частиц поперек пленки, имеет ярко выраженный осцилляционный характер, связанный с ограниченностью системы и не проявляющийся для объемной фазы модельной жидкости. В нашем случае АКФ определяется суперпозицией экспонент с комплексным в общем случае показателем и весами, зависящими от параметров жидкости, размера полости и относительной координаты r/R точки в ней. Таким образом, дальновременная ветвь АКФ скорости обладает заметным осцилляционным характером. В частности, нули звуковой ветви АКФ продольной компоненты скорости нерелаксирующей жидкости определяются выражением

$$t_{\lambda n}=\frac{\arccos\sqrt{\Gamma k_\lambda/(2c)}+\pi(n-1)}{\sqrt{c^2k_\lambda^2-\Gamma^2k_\lambda^4/4}}\quad, \tag{6}$$

где $\Gamma=(c_p/c_v-1)\chi+(\zeta+\frac{4}{3}\eta)/\rho$, $n=1,2,\ldots$

Последний параграф посвящен изучению флуктуаций капли вязкой сжимаемой жидкости, диффундирующей в маловязкой среде. В предположении, что поверхностное натяжение достаточно велико, чтобы сохранить сферическую форму капли при любом деформационном влиянии сил вязкости, в качестве граничных выбраны условия непрерывности касательных напряжений на границе раздела и равенство нулю нормальных смещений поверхности. В этом случае получаем более сложные по сравнению с (2) трансцендентные уравнения для собственных значений краевой задачи. ДСФ изучен с учетом движения капли как целого со стоксовым коэффициентом диффузии. Анализ показывает, что появление характерного для однородной жидкости Бриллюэновского пика происходит при меньших размерах капли, чем в случае жидкости, ограниченной жесткой сферической поверхностью.

В третьей главе изучены спектры флуктуаций гидродинамических полей с учетом поверхностных коллективных возбуждений микроэмульсий. Микроэмульсии образуются в смесях двух нерастворимых жидкостей с добавлением поверхностно-активного вещества (ПАВ). При критической концентрации ПАВ термодинамически выгодным является образование мицелл - капелек одной жидкости в другой, границы которых насыщены ПАВ. В растворах молекул, способных упаковываться в двухслойную мембрану, образуются везикулы. В работе рассматриваются слабые растворы капель жидкости, сферических мицелл или везикул. В этом случае можно ограничиться рассмотрением одной отдельно взятой капли. Жидкости по-прежнему считаются сжимаемыми и описываются линеаризованными уравнениями Навье-Стокса. Флуктуации температуры для упрощения расчетов не учитывались. Малые отклонения формы поверхности от сферы записываются в виде рядов по сферическим гармоникам

$$R(\vartheta,\varphi,t) = R\,[1 + \sum_{l,m} U_{lm}(t)\, Y_{lm}(\vartheta,\varphi)],\quad l \geq 2.$$

Аналогичное разложение определяет отклонение от равновесной концентрации ПАВ

$$n^s(\vartheta,\varphi) = n^s[1 + \sum_{l,m} \nu_{lm}\, Y_{lm}(\vartheta,\varphi)].$$

Граничные условия для гидродинамических полей на бесконечно тонкой поверхности раздела учитывают избыточное Лапласово давление и дополнены спонтанными поверхностными источниками напряжений и членами, зависящими от скорости движения границы

$$\upsilon_r^s = \dot{R}\,,\quad \vec{\upsilon}_1 = \vec{\upsilon}_2\,,$$

$$\rho_s \dot{\upsilon}_r^s - \delta p_1 + \left(\zeta_1 - \frac{2}{3}\,\eta_1\right) div\,\vec{\upsilon}_1 + 2\eta_1 \frac{\partial \upsilon_{1r}}{\partial r} =$$

$$= -\delta \dot{p}_2 + \left[\zeta_2 - \frac{2}{3}\eta_2\right] div \vec{\upsilon}_2 + 2\eta_2 \frac{\partial \upsilon_{2r}}{\partial r} - \qquad (7)$$

$$- \sum_{l,m} \frac{\alpha_l}{R} (l(l+1)-2) U_{lm} Y_{lm} + f_r^s ,$$

$$\rho_s \dot{\upsilon}_t^s - \frac{\partial \alpha_l}{\partial n_s} \nabla_t \delta n^s + \nabla_t (\eta_1 \upsilon_{1r} - \eta_2 \upsilon_{2r}) + \left[\frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{r}\right] (\eta_1 \upsilon_{1t} - \eta_2 \upsilon_{2t}) = f_t^s .$$

Здесь индексы r и t обозначают радиальную и касательную составляющие векторов, f_a^s - компоненты случайных сил, определенные разностью приповерхностных напряжений, $\alpha_l = \alpha(n^s) - 2\beta/R + l(l+1)\chi/R^2$ (α, β, χ - коэффициенты разложения поверхностной энергии по локальным радиусам кривизны). Система (7) дополнена также законом сохранения поверхностной концентрации. Линейность гидродинамических уравнений и граничных условий позволяет искать полное решение краевой задачи в виде суммы двух вкладов. Первый описывается неоднородными уравнениями во всем пространстве и нулевым значением скорости на границе. Он подробно исследован в § 2.1. Второй вклад соответствует однородным уравнениям без объемных источников и удовлетворяет граничным условиям (7). С учетом выражения для средней мощности, развиваемой случайными поверхностными источниками, и ФДТ найдены спектральные плотности флуктуаций амплитуд тепловых течений и выражение для ДСФ, которое для жидкости внутри капли имеет вид

$$S(\vec{k},\omega) \sim \frac{\omega^2}{1+(\omega\tau_1)^2} \sum_l (2l+1) \left| j_l(kR) \frac{Q_l(kR)-Q_l(x)}{(kR)^2-x^2} \right|^2 \langle |C_{1l}^L|^2 \rangle_\omega , \qquad (8)$$

где $\tau_1 = (\frac{4}{3}\eta_1 + \zeta_1)/(\rho_1 c_1^2)$, $x = \omega R/(c_1\sqrt{1-i\omega\tau_1})$, $Q_l(x) = x\frac{\partial}{\partial x} \ln j_l(x)$. Спектральная плотность флуктуаций амплитуды разложения продольной составляющей эйлерового поля скорости $\langle |C_{1l}^L|^2 \rangle_\omega$ зависит от термодинамических и кинетических коэффициентов капли, растворителя и ПАВ. Графически представлены результаты изучения поведения ДСФ при наличии или отсутствии на границе ПАВ и различных вязкостей жидкости и значений волновых чисел излучения. Учет помимо нормальных источников (§ 3.1) также и тангециальных приводит к появлению поверхностных концентрационных мод и значительно увеличивает вклад в ДСФ низкочастотных возбуждений. Низкочастотная ветвь ДСФ чувствительна к изменению поверхностного модуля упругости (см. Рис.2).

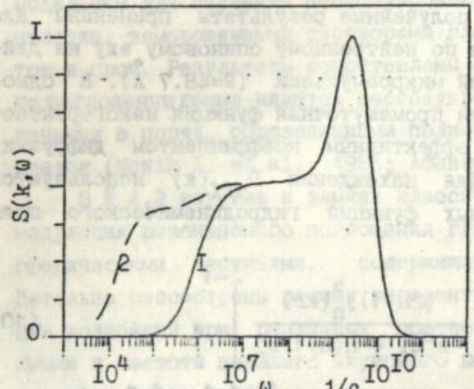

Рис.2. Динамический структурный фактор микроэмульсии ($R=400$ Å, $\alpha=0.05$ Дж/м^2, $kR=0.3$; $\rho_1=900$, $\rho_2=10^3$ кг/м^3; $\eta_1=1$, $\eta_2=0.2$ кг/(м·с)) для двух значений поверхностного модуля упругости $-n^s\partial\alpha(n^s)/\partial n^s$: $5\cdot10^{-2}$ (1), 10^{-3}(2) Дж/м^2.

В § 3.3 проведен анализ флуктуаций формы поверхности мицелл и везикул при различных соотношениях между их размерами, глубиной проникновения вязкой волны и длиной звуковой волны. Типичный размер мицелл порядка 10^2– 10^3 Å, поэтому для низкочастотных возбуждений $\omega R/c \ll 1$. Если при этом глубина проникновения сдвиговой волны велика по сравнению с размером мицеллы, то $\omega R^2/\nu \ll 1$, и колебания будут затруднены – возможны лишь искажения формы поверхности. В этом случае главный вклад в спектральную плотность флуктуаций амплитуды поверхности найден в виде

$$\langle|U_{lm}|^2\rangle_\omega \simeq \frac{\kappa T}{\pi R^2\alpha_1(l+2)(l-1)\tau_{\alpha l}}\,\frac{1}{\omega^2+\tau_{\alpha l}^{-2}},$$

$$\tau_{\alpha l}^{-1} = \alpha_1(l+2)(l-1)l(l+1)(2l+1)\,\frac{\eta_1+\eta_2}{Rq_lp_l}, \tag{9}$$

$q_l = 2(l^2-1)\eta_1+(2l^2+1)\eta_2$, $p_l = (2l^2+4l+3)\eta_1+2l(l+2)\eta_2$.

Наряду с этими условиями исследован ряд других, в том числе определяющих слабозатухающие капиллярные возбуждения везикул. Установлено также, что концентрационная мода по дробностепенному закону зависит от вязкости.

В § 3.4 рассмотрен также случай возбуждений капли с учетом поверхностной вязкости. Для этого в уравнения (7) добавляются поверхностные вязкие напряжения и дополнительные случайные источники. Такая модель является приемлемой как для везикул, так и для биологических клеток и органелл сферической формы.

В последнем параграфе полученные результаты применены для интерпретации экспериментов по нейтронному спиновому эху на дейтерированной водно-декановой микроэмульсии ($R=48.7$ Å). В одноэкспоненциальном приближении промежуточная функция некогерентного рассеяния определяется эффективным коэффициентом диффузии, $S(k,t) \sim \exp(-D_{eff}\, k^2 t)$. Для нахождения $D_{eff}(k)$ используются выражения для корреляционных функций гидродинамического поля скорости

$$D_{eff}(k) = \left[k^2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n+1) j_n^2(kr)}{k^2 D_t + n(n+1) D_r} \right]^{-1}, \qquad (10)$$

$$D_r = \frac{1}{3} \left\langle \frac{1}{2} \mathrm{rot}\, \vec{v}(\vec{r},t) \frac{1}{2} \mathrm{rot}\, \vec{v}(\vec{r},0) \right\rangle_{\omega=0}, \qquad D_t = \frac{1}{3} \langle \vec{v}(\vec{r},t) \vec{v}(\vec{r},0) \rangle_{\omega=0} .$$

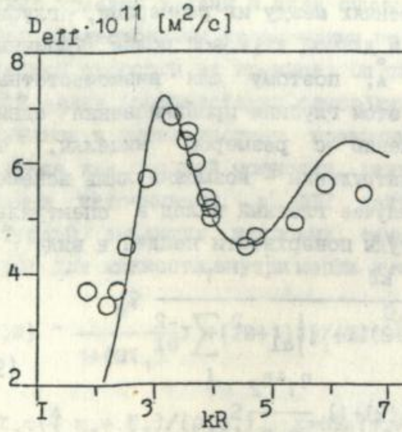

Рис.3. Зависимость $D_{eff}(k)$ при $\rho_1=\rho_2=1.1 \cdot 10^3$ кг/м^3, $\eta_1=8 \cdot 10^{-2}$, $\eta_2=8 \cdot 10^{-4}$ кг/(м·с). Сплошная линия - расчет, о - эксперимент (Farago B. et al, 1989)

В первом параграфе <u>четвертой главы</u> построен спектр резонансного поглощения гамма-квантов жидкостью в сферической полости. Он определяется лаплас-образом АКФ скорости $\langle \vec{v}\vec{v} \rangle_q$

$$\sigma(\omega) \sim \mathrm{Re}\, (q + p^2 \langle \vec{v}\vec{v} \rangle_q /3)^{-1} , \qquad (11)$$

где $q = \Gamma/2 - i\omega$, ω - сдвиг частоты гамма-кванта от резонансной, Γ - обратное время жизни возбужденного состояния мессбауэровского атома, $\vec{p}$ - волновой вектор гамма-кванта. Спектр имеет нелоренцеву форму и существенно зависит от параметров жидкости, размера полости и относительной координаты находящегося в ней поглощающего атома. Такое гидродинамическое описание может быть модельным для изучения мессбауэровского поглощения жидкостью в полости, замороженными растворами глобулярных макромолекул, клеток и проч. Результаты сопоставлены с экспериментальными данными по поглощению гамма-квантов мессбауэровскими метками, локализованными в порах, образованными полимерными цепями, и в мембранах клеток (Nowik I. et al., 1985; Афанасьев А.М. и др., 1989).

В § 4.2 изучена в рамках классического подхода акустическая модуляция резонансного поглощения гамма-квантов малыми упругими сферическими частицами, содержащими мессбауэровский атом. Детально рассмотрены режимы когерентной и некогерентной генерации колебаний при различных соотношениях естественной ширины линии и частоты внешнего звукового поля (Ω), длина волны которого значительно превышает размеры сферических вкраплений. При ультразвуковой модуляции ($\Omega \sim \Gamma$) спектры представляют собой набор сателлитных линий, сдвинутых относительно линии источника на частоты, кратные Ω. Найдено удобное для изучения низкочастотной асимптотики ($\Omega \ll \Gamma$) выражение для спектра поглощения

$$\sigma(\omega) \sim \mathrm{Re}\, \frac{1}{q}\ {}_1F_2\left(\frac{1}{2}\ ;\ 1+\frac{\nu}{2}\ ,\ 1-\frac{\nu}{2}\ ;\ -A_o^2 \right), \quad \nu=\frac{2q}{i\Omega}, \qquad (12)$$

где ${}_1F_2$ - гипергеометрическая функция, A_o - эффективная глубина модуляции

$$A_o=a_o\left[(\vec{p}\vec{n}_z)^2 + \left(\vec{p}\vec{r}\,\frac{\chi_1^2\mu_1/k_1}{2\mu_2+3\lambda_2+4\mu_1}\right)^2\right]^{1/2},$$

здесь λ, μ - коэффициенты Ламе, $k=\Omega\sqrt{\rho/(\lambda+2\mu)}$, $\chi=\Omega\sqrt{\rho/\lambda}$ - волновые числа продольной и поперечной волны (параметрам внешней среды приписан индекс 1, а внутренней - 2), a_o, $\vec{n}_z$ - амплитуда и направление распространения звуковой волны, $\vec{r}$ - радиус-вектор поглощающего атома. Для ненулевых значений $\cos(\vec{p}\,\hat{}\,\vec{n}_z)$ с ростом звуковой частоты Ω или амплитуды a_o спектр (12) расщепляется на две линии. Если же угол между направлениями движения гамма-квантов и звука равен 90°, то спектр синглетный и в зависимости от частоты излучения меняется монотонно, с увеличением частоты звука и амплитуды колебаний его максимум понижается.

Анализ показал, что наличие сферических вкраплений приводит к возможности модуляции звуком достаточной мощности спектров резонансного поглощения гамма-квантов при произвольном направлении их распространения по отношению к звуковой волне.

Акустическая модуляция мессбауэровских спектров является высокоточным методом, это вытекает из того обстоятельства, что измерение частоты является более простой задачей, чем измерение скорости. Путем сопоставления экспериментальных и расчетных спектров возможно извлечение упругих характеристик сферических частиц при известных упругих свойствах матрицы, а также уширения линий, обусловленного тепловыми движениями атомов в ограниченной области.

В приложении произведено суммирование специального ряда Бесселя, полезного для простого представления АКФ скорости жидкости в полости. Результат имеет самостоятельный интерес для первой краевой задачи гидродинамики.

Основные результаты.

1. Найдены спектральные плотности корреляционных функций гидродинамических полей скорости и плотности вязкой сжимаемой жидкости, заключенной в сферической полости. Результаты отличаются от спектральных плотностей для однородной неограниченной жидкости дискретным характером волновых чисел, определяемых из граничных условий.

2. Получены и исследованы временные автокорреляционные функции поля скорости жидкости в сферической полости. Показано, что автокорреляционная функция продольной компоненты скорости обладает дальновременными осцилляциями.

3. Исследованы спектральные свойства коллективных возбуждений мицелл и везикул, моделируемых каплей одной вязкой сжимаемой жидкости в другой. Отмечено, что наличие на границе раздела жидкостей поверхностно-активных веществ вносит существенный вклад в динамический структурный фактор капли и растворителя.

4. Проведен анализ зависимости спектров флуктуаций поверхностных мод мицеллы от вязкостей, коэффициента поверхностного натяжения и сжимаемостей. Исследованы условия, определяющие слабозатухающие капиллярные возбуждения везикул. Установлено, что концентрационная мода по дробно-степенному закону зависит от вязкости.

5. Предложена интерпретация экспериментов по спаду амплитуды нейтронного спинового эха на водно-декановой микроэмульсии.

6. Изучены и сопоставлены с экспериментом спектры резонансного поглощения гамма-квантов сжимаемой жидкостью в полости, содержащей мессбауэровские метки.

7. Развита теория резонансного поглощения гамма-квантов малыми упругими сферическими частицами, содержащими мессбауэровские атомы, в условиях внешней акустической модуляции. Форма спектра существенно зависит от параметров звуковой волны, упругих свойств частицы и окружающей матрицы, режима возбуждения звуковых колебаний и уширения спектра, обусловленного тепловыми движениями в ограниченной области.

8. Показано, что акустическая модуляция спектров поглощения сферическими вкраплениями возможна, в отличие от однородных образцов, при произвольной взаимной ориентации направлений распространения акустической волны и потока гамма-квантов.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Звелиндовский А.В. Модулированный спектр мессбауэровского поглощения// Физика твердого тела. Всес. конф.: Тез. докладов. Ред.Савицкая Л.К. Томск: Том.ун-т. 1988. С.14.
2. Затовский А.В., Звелиндовский А.В. Акустическая модуляция спектра мессбауэровского поглощения малыми частицами// Физика твердого тела. 1989. Т.31, N 3. С.64-67.
3. Звелиндовский А.В. Эйлеровы корреляционные функции скорости жидкости в сферической области// Укр. физич. журнал. 1990. Т.35, N 7. С.987. - Деп.ВИНИТИ N 547-В90 от 29.01.90. Киев:Ред.УФЖ. 1990. 13 с.
4. Затовский А.В., Звелиндовский А.В. Гидродинамические флуктуации в сферическом объеме// Журнал технич. физики. 1990. Т.60, N 9. С.129-131.
5. Звелиндовский А.В. Гидродинамические флуктуации ограниченных систем// Матер.IV конф. мол. ученых, Львов, 18-19 апреля 1990 г., Львов: Львов.ун-т. 1990. С.34-36.
6. Затовский А.В., Звелиндовский А.В. Флуктуации гидродинамических полей в сферической полости// VIII Всес.симпозиум по межмолекулярному взаимодействию и конформациям молекул: Тез.докладов.Ч.2. Новосибирск:Ин-т неорг.химии. 1990. С.22.
7. Звелиндовский А.В. О флуктуациях плотности жидкости в сферической полости// Физика жидк.сост. 1991, N 19. С.3-7.

8. Lisy V., Zatovsky A.V., Zvelindovsky A.V. Hydrodynamic fluctuations of spherical micelles and vesicles// Physica A. 1992. V.183. P.262-278.
9. Затовский А.В., Звелиндовский А.В., Лисы В. Коллективные возбуждения мицелл и везикул// Журнал технич. физики. 1992. Т.62, N 8.
10. Затовский А.В., Звелиндовский А.В. Спектральные свойства тепловых флуктуаций мелких капель жидкости// Оптика и спектроскопия. 1992. Т.72, N 3. С.648-651.
11. Lisy V., Zatovsky A.V., Zvelindovsky A.V. Hydrodynamic correlation theory of compressible fluid vesicles and microemulsion droplets// Technical Univ. Conf., Košice, Sept.14-16, 1992. Book of Lectures (Physics). P.58-63.

Зак. 1283, тир. 100, подп. к печ. 11. 12. 92 г.

Усл. печ. лист. 1. КМП ОИИМФ Одесса,
ул. Мечникова, 34.

8. Lisy V., Zatovsky A.V., Zvelindovsky A.V. Hydrodynamic fluctuations of spherical micelles and vesicles// Physica A. 1992. V.183. P.262-272

9. Затовский А.В., Звелиндовский А.В., Лисы В. Механические возбуждения мицелл и везикул// Журнал технич. физики. 1992. Т.62, N 8.

10. Затовский А.В., Звелиндовский А.В. Спектральные свойства тепловых флуктуаций малых капель жидкости// Оптика и спектроскопия. 1992. Т.72, N 3. С.648-651.

11. Lisy V., Zatovsky A.V., Zvelindovsky A.V. Hydrodynamic relaxation theory of compressible fluid vesicles and microemulsion droplets// Technical Univ. Conf., Košice, Sept.14-16, 1992. Book of Lectures (Physics). P.58-63.