

АКАДЕМИИ НАУК БЕЛОРУССКОЙ ССР
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ИНСТИТУТ ФИЗИКИ

На правах рукописи

Зубово-Лаврову
Валерию Павловичу
Сергеевичу

ЗАВТРАК Сергей Тимофеевич

РАДИАЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МАЛЫХ ЧАСТИЦ ВО
ВНЕШНИХ ПОЛЯХ

01.04.02 теоретическая физика

9.1.91.
Зубов

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание учёной степени доктора
физико-математических наук

МИНСК 1991 г.

Зубов

Работа выполнена в Белорусском государственном университете им. В.И.Ленина

Официальные оппоненты: доктор технических наук профессор ЛЕВКОВСКИЙ Ю.Л. (ЦНИИ им. академика А.Н.Крылова),

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник ТОЛКАЧЕВ В.А. (ИФ АН БССР)

доктор физико-математических наук, профессор ХРУСТАЛЕВ О.А. (МГУ)

Ведущая организация : Институт общей физики АН СССР

Защита состоится "10" апреля 1991 г. в 16 часов на заседании Специализированного совета Д 006.01.02 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук при Институте физики АН БССР по адресу : 220602, Минск, ГСП, Ленинский просп., 70.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики АН БССР.

Автореферат разослан "13" апреля 1991 г.

Ученый секретарь специализированного совета  КУРОЧКИН Ю.А.

Актуальность работы. Исследования воздействия внешних высокочастотных полей (акустических, электромагнитных) на малые частицы (дисперсные частицы в жидкостях и газах, элементарные частицы и атомы) являются актуальными и бурно развиваются последние годы. Это связано с их непосредственными применениями в химических технологиях, теплоэнергетике, криогенике, нефтегазодобывающей и строительной промышленности, ракетной технике, подводной акустике, атомной физике и т.д. При этом требуется углубленное понимание процессов, протекающих при таком воздействии. Данная работа посвящена радиационному взаимодействию малых частиц и охватывает большой круг задач. Под словом "радиационное" понимается следующее. В поле внешней волны частицы начинают совершать монопольные, дипольные и т.д., колебания. Это приводит к рассеянию ими волн. Хорошо известно, что на отдельные изолированные частицы во внешнем высокочастотном поле действуют средние по времени силы. Вынужденные колебания частиц приводят к тому, что на каждую из них, помимо внешней волны, воздействует также и поле, рассеянное соседней частицей. Вследствие этого как раз и возникают дополнительные средние силы, для которых в диссертации применяется название "радиационные".

Диссертацию можно условно разделить на 2 части. В первой исследовано влияние сжимаемости жидкости на радиационное взаимодействие дисперсных частиц (газовых пузырьков и твердых частиц) в поле звуковой волны. Соответствующие силы носят название сил Бьеркнеса и Кенига. Они играют важную роль в процессах ультразвуковой дегазации жидкостей, расплавленных металлов и полимеров, акустической коагуляции суспензий, осаждения аэрозолей. Изучению сил Бьеркнеса и Кенига посвящено большое число работ, в которых предполагалось, что длина звуковой волны намного превосходит как размеры частиц, так и характерное расстояние между ними (исключение составляет работа Б.Е.Немцова [1] , о которой будет сказано особо). Такое предположение позволяет не учитывать сжимаемость жидкости и значительно упростить решение задачи. На практике, однако, применяют ультразвуковые

волны с частотой 10^4 – 10^9 Гц [2]. Длина волны такого излучения может быть сравнима и даже меньше расстояния между дисперсными частицами. Возникают 2 вопроса:

1. Как изменится при учёте сжимаемости жидкости структура сил радиационного взаимодействия дисперсных частиц?

2. Как изменится при этом поведение дисперсных частиц во внешнем поле?

Одна из глав диссертации посвящена гидродинамическим эффектам радиационного взаимодействия газовых пузырьков в жидких диэлектриках при воздействии на них мощных переменных электрических полей. Изучение упругих свойств жидкостей с фазовыми включениями и их поведение во внешних электрических и магнитных полях вызывает давний интерес исследователей и представляет собой быстро развивающееся научное направление, имеющее многочисленные практические приложения.

Во второй части диссертации рассматривается радиационное взаимодействие элементарных частиц в классической и квантовой теории поля. Классическая теория построена на примерах взаимодействия между зарядами и между магнитными моментами в поле электромагнитной волны, а также между нерелятивистскими частицами в поле скалярной волны. Квантовая теория построена на примерах решения трех задач: взаимодействия двух магнитных моментов в поле электромагнитной волны, взаимодействия двух фермионов в поле скалярной волны, и, наконец, взаимодействия двух квантовых зарядов в присутствии высокочастотной электромагнитной волны.

Наиболее активно воздействие внешних волн на поведение элементарных частиц изучалось и изучается в настоящее время в квантовой электродинамике. Упомянем здесь работы Р.Фейнмана / 1954, 1955 /, Ю.Швингера / 1956 /, В.Фарри / 1951 /, Д.М.Гитмана, Е.С.Фрадкина, Ш.М.Шварцмана / 1960, 1970, 1989 /, А.И.Никишова / 1964, 1967, 1979 /, В.И.Ритуса / 1970, 1972, 1986 /, В.Н.Байера, В.М.Каткова, А.М.Мильштейна / 1971, 1973, 1975, 1976 /, А.В.Гапонова, М.А.Миллера / 1958 /, А.А.Соколова, И.М.Тернова, В.Г.Багрова / 1967, 1974, 1989 /, В.Ханнебергера / 1968, 1974 /, М.Гаврилы, И.Каминского / 1984 / и многих других.

Применительно к системе двух зарядов воздействие мощной электромагнитной волны изучалось на примере водородоподобных атомов (сдвиги уровней, ионизация). Фактически же в цитируемых работах все воздействие высокочастотного поля на атом сводилось к воздействию на легкий электрон, "дрожавший" в волне. Тяжелое же ядро рассматривалось как неподвижное. А между тем, как показано в диссертации, радиационное взаимодействие наиболее эффективно проявляется как раз между частицами с примерно одинаковыми отношениями абсолютных величин зарядов к их массам. При этом появляется ряд интересных новых эффектов.

Таким образом, несмотря на кажущуюся отдаленность областей физики, рассматриваемых в диссертации, обе ее части объединяет то, что природа радиационных сил одинакова.

И, наконец, в диссертацию включены результаты исследования некоторых особенностей поведения системы дисперсных частиц в жидкости в поле низкочастотной звуковой волны. Т.е. рассматривается случай, когда длина внешней звуковой волны в несущей фазе намного превосходит характерное расстояние между частицами. Решена задача о коллапсе облака газовых пузырьков в поле низкочастотной звуковой волны, имеющая важное значение при исследовании самопросветления звука. Рассмотрены дополнительные особенности рассеяния звуковой волны на облаке газовых пузырьков в жидкости. Кроме того, в работе предложено 2 способа акустического контроля степени уплотнения (или газосодержания) бетонных смесей при виброформовании. Последние являются одной из актуальных задач в технологии формования бетонных и железобетонных плит. Известно, что 1% недоуплотнения бетонной смеси приводит к потере только прочности бетона на 7–10%. Необходимость контроля степени уплотнения особенно возрастает при автоматизации технологических процессов. На сегодняшний день отсутствуют точные и надежные методы такого контроля.

Цель работы – теоретическое исследование эффектов радиационного взаимодействия малых частиц в переменных внешних полях.

При этом ставились следующие задачи:

1. Учесть сжимаемость жидкости в задаче о радиационном взаимодействии двух газовых пузырьков в поле звуковой волны. Рассмотреть случаи гармонической плоской бегущей и стоячей волны, а также произвольной неоднородной волны. Аналогичным образом исследовать систему из нескольких пузырьков.
2. Решить ту же задачу для двух твердых сферических частиц, а также задачу о радиационном взаимодействии этих частиц, совершающих гармонические осцилляции в отсутствие внешней волны.
3. Исследовать эффекты радиационного гидродинамического взаимодействия газовых пузырьков в жидких диэлектриках, пульсирующих под влиянием переменных электрических полей. Изучить изменение упругих свойств жидких диэлектриков с газовыми пузырьками в электрических полях.
4. Исследовать относительное движение дисперсных частиц / газовых пузырьков и твердых частиц / в сжимаемой жидкости в поле звуковой волны и возможность образования новых видов связанных состояний частиц, отличных от коагуляции.
5. Исследовать задачу о коллапсе облака газовых пузырьков в поле низкочастотной звуковой волны.
6. Проанализировать особенности низкочастотного рассеяния звуковой волны на облаке газовых пузырьков в жидкости. Разработать методы акустического контроля газосодержания бетонных смесей в процессе виброформования.
7. Исследовать эффекты радиационного взаимодействия элементарных частиц в классической теории поля на примерах:
 - двух классических зарядов, совершающих вынужденные колебания в поле электромагнитной волны;
 - аналогичной задачи для двух классических магнитных моментов;
 - двух нерелятивистских частиц в поле скалярной волны.
8. Построить квантовую теорию радиационного взаимодействия элементарных частиц в переменных внешних полях на примерах:

- двух квантовых магнитных моментов в поле электромагнитной волны;
 - двух фермионов в поле скалярной волны;
 - двух квантовых зарядов в поле электромагнитной волны.
- Исследовать возможность образования новых видов связанных состояний из нескольких заряженных частиц в высокочастотном электромагнитном поле.

Научная новизна результатов определяется тем, что впервые:

1. Получено полное выражение для силы радиационного взаимодействия двух газовых пузырьков (силы Бьеркнеса) в сжимаемой жидкости в поле бегущей звуковой волны. Это выражение содержит в себе, помимо известной ранее "классической" короткодействующей ($\sim r^{-2}$) составляющей, также и новые далекодействующие ($\sim r^{-1}$) составляющие двух типов. Первый тип направлен по $\vec{n} = \vec{r}/r$ (\vec{r} - вектор относительного расстояния между центрами пузырьков). Он был обнаружен в работе Б.Е.Немцова [1]. Второй тип направлен вдоль волнового вектора \vec{k} . Этот тип был утерян в [1]. Величина и знак полной силы Бьеркнеса зависят от фазы запаздывания $\vec{k} \cdot \vec{r}$ и фазы переизлучения $k r$, в результате чего при определенных условиях эта сила может обращаться в ноль. Если "классическая" сила Бьеркнеса и далекодействующая составляющая 1-го типа приводят к взаимному притяжению либо отталкиванию пузырьков, то далекодействующая составляющая 2-го типа приводит к их вращению друг относительно друга даже в том случае, если пузырьки одинаковы. В выражении для силы Бьеркнеса феноменологически учтена диссипация энергии, которая происходит при пульсациях пузырьков вследствие вязкости, теплопроводности жидкости и переизлучения. Сумма сил взаимодействия, действующих между пузырьками, не равна нулю. Объясняется это тем, что часть количества движения уносится рассеянной волной на бесконечность. Вследствие учёта сжимаемости жидкости рассматриваемая система перестает быть замкнутой.
2. Аналогичные результаты получены для полного выражения силы радиационного взаимодействия двух газовых пузырьков

ков в поле стоячей звуковой волны. Отличие от случая бегущей волны заключается в том, что силы радиационного взаимодействия оказываются зависящими не только от вектора относительного расстояния между центрами пузырьков $\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$, но и порознь от радиус-векторов их центров \vec{r}_1 и \vec{r}_2 . Объясняется это тем, что стоячая звуковая волна, в отличие от бегущей является пространственно неоднородной.

3. Получено полное выражение для силы радиационного взаимодействия пузырьков в сжимаемой жидкости в поле пространственно неоднородной волны. Дальнействующие составляющие 2-го типа оказываются направленными по локальным градиентам внешнего поля.
4. Установлено, что учёт сжимаемости жидкости приводит к аналогичным изменениям структуры силы радиационного взаимодействия двух твердых частиц — силы Кёнига. У силы Кёнига, помимо известной ранее "классической" короткодействующей ($\sim r^{-4}$) составляющей, появляются три новых вида далекодействующих ($\sim r^{-3}$, $\sim r^{-2}$, $\sim r^{-1}$) составляющих. Величины и знаки этих составляющих зависят от фазы переизлучения $K\Gamma$ и фазы запаздывания $K\vec{r}$ (последнее имеет место, если колебания частиц являются вынужденными, например, в поле звуковой волны). Выражения для сил радиационного взаимодействия твердых частиц рассчитаны в трёх случаях: в поле бегущей плоской звуковой волны, в поле стоячей волны и в случае произвольных гармонических осцилляций в отсутствие внешнего воздействия.
5. Исследованы эффекты радиационного гидродинамического взаимодействия двух газовых пузырьков, пульсирующих в жидких диэлектриках под влиянием переменных электрических полей. При этом обычная сила радиационного давления (на изолированные пузырьки) практически равна нулю, а между ними возникают, кроме короткодействующей силы Бьеркнеса, далекодействующие силы только 1-го типа (далекодействующие силы 2-го типа также практически равны нулю). Показано, что воздействие электрических полей на жидкие диэлектрики с пузырьками газа приводит к изменению упругих свойств таких систем.

6. С учётом полученных результатов исследовано относительное движение дисперсных частиц (газовых пузырьков и твердых частиц) в сжимаемой жидкости под влиянием звуковой волны. При этом обнаружено, что радиационное взаимодействие частиц при определенных условиях может приводить к образованию нового вида связанных состояний частиц, отличных от коагуляции. Такие состояния названы в диссертации состояниями зависания.
7. Показано, что воздействие высокочастотных внешних полей на классические элементарные частицы может приводить к появлению далекодействующих радиационных сил. Построена полуклассическая теория далекодействующего радиационного взаимодействия магнитных моментов (магнитные моменты считаются квантовыми, а поле внешней волны и волн, рассеиваемых моментами — классическим). Показано, что две одновременно заряженных классических частицы (например, два классических электрона), помещенных в поле мощной электромагнитной волны, могут образовывать связанную пару, перемещаясь в пространстве как одно целое. Это оказывается возможным благодаря наличию далекодействующих радиационных сил, влияние которых на больших расстояниях между частицами ($K\Gamma \gg 1$) может стать доминирующим по сравнению с обычными кулоновскими силами.
8. Построена квантовая теория радиационного взаимодействия элементарных частиц в переменных внешних полях. Эта теория показывает, что воздействие внешних полей может приводить не только к существенному изменению обычного потенциала взаимодействия частиц в ближней зоне ($K\Gamma \ll 1$), но и к появлению нового вида сил взаимодействия, а именно далекодействующих ($\sim r^{-1}$) радиационных сил (в дальней зоне $K\Gamma \gg 1$).
9. В приближении однофотонного обмена получено выражение для эффективного потенциала взаимодействия двух квантовых зарядов в присутствии электромагнитной волны. В пределе не слишком сильных полей (когда перенормированная масса электрона в высокочастотном поле мало отличается

от его массы в отсутствие поля) , а масса одной из частиц стремится к бесконечности, это выражение переходит в формулу для потенциала Крамерса-Ханнеберга. Последний соответствует водородоподобному атому в поле высокочастотной электромагнитной волны. В отличие от потенциала Крамерса-Ханнеберга построенный в диссертации эффективный потенциал учитывает:

- релятивистские эффекты, связанные с вынужденными дипольными колебаниями зарядов в поле (например, перенормировку массы заряда в поле);
- переизлучение зарядами электромагнитных волн;
- эффект запаздывания во времени при распространении волн между зарядами.

Показано, что из-за релятивистских эффектов, в отличие от классической теории, два квантовых электрона не могут образовывать связанную пару в поле электромагнитной волны. Однако оказывается возможным образование нового вида связанных состояний в системе нескольких квантовых зарядов (трех, четырех и т.д.), например, в системах: атом водорода + позитрон, позитроний + позитрон, позитроний + электрон. Последнее оказывается возможным из-за наличия далекодействующих радиационных сил, которые на больших расстояниях могут стать доминирующими. Эти состояния очень похожи на те, которые обнаружены в акустике и названы состояниями зависания.

10. Получен ряд результатов, которые могут иметь непосредственное практическое приложение:

- решена задача о коллапсе сферического облака газовых пузырьков в поле низкочастотной звуковой волны в жидкости;
- показано, что при рассеянии низкочастотной звуковой волны на облаке газовых пузырьков в жидкости наряду с резонансными максимумами отражения могут иметь место минимумы, при которых абсолютная величина амплитуды отраженной волны практически равна нулю; первый минимум отражения должен наблюдаться на более высокой частоте, чем первый максимум;
- предложены 2 метода акустического контроля газосодер-

жания бетонных смесей при виброформовании; 1-ый метод основан на измерении амплитудно-фазовой модуляции звуковой волны, прошедшей сквозь смесь; 2-ой метод основан на анализе колебаний свободной поверхности смеси.

Достоверность приводимых в диссертации результатов обусловлена следующими предпосылками:

- все проведенные вычисления базировались на точных законах и уравнениях классической и квантовой физики;
- в предельных случаях все полученные результаты точно переходят в соответствующие результаты предшествующих работ.

Научная и практическая значимость результатов вытекает из актуальности темы. В гидродинамике модель несжимаемой жидкости является существенной идеализацией, позволяющей, тем не менее, значительно упростить решение ряда задач. Если при этом удастся учесть сжимаемость жидкости наряду с диссипативными процессами вязкостью, теплопроводностью, переизлучением, то это позволяет значительно приблизить теоретические результаты к реальной действительности. Особый научный интерес представляет случай, когда результатом этого учета является не просто получение малых поправок, а обнаружение качественно новых эффектов (например, обнаружение далекодействующих радиационных сил и нового вида связанных состояний частиц). Подобная ситуация имеет место в настоящей работе.

То же самое относится и к классической и квантовой теории, рассматривающей радиационное взаимодействие элементарных частиц. В диссертации показано, что в результате периодического внешнего воздействия может существенно изменяться взаимодействие частиц не только в ближней зоне ($kr \ll 1$), но и появляться новый вид сил - далекодействующих радиационных сил (в области $kr \gg 1$). Одним из следствий этого, например в квантовой электродинамике, является, наряду со сдвигом квантовых уровней, также возможность образования нового вида связанных состояний в системе нескольких зарядов.

Результаты диссертации могут быть использованы в научных исследованиях, ведущихся в БГУ им. В.И.Ленина, НИИ ядерных проблем при БГУ им. В.И.Ленина, ИТМО АН СССР

им. А.В.Лыкова, ЦНИИ им.А.Н.Крылова, МГУ им. М.В.Ломоносова, Институте гидродинамики им. М.А.Лаврентьева, Институте Общей физики АН СССР, БелНИИС НПО Белстройнаука и других научных центрах страны.

На защиту выносятся :

1. Полное выражение для силы радиационного взаимодействия двух газовых пузырьков (силы Бьеркнеса) в сжимаемой жидкости в поле бегущей, стоячей и произвольной пространственно-неоднородной волны с учётом диссипативных потерь (последние учтены феноменологически).
2. Полное выражение для радиационных сил, действующих в системе нескольких газовых пузырьков, помещенных в поле бегущей, стоячей и произвольной неоднородной звуковой волны.
3. Полное выражение для сил гидродинамического типа, действующих между газовыми пузырьками, пульсирующими в жидких диэлектриках под влиянием переменного электрического поля.
4. Результаты изменения упругих свойств жидких диэлектриков с пузырьками газа в постоянном и переменном электрических полях.
5. Полное выражение для силы радиационного взаимодействия двух твердых сферических частиц (силы Кёнига) в сжимаемой жидкости в поле бегущей плоской звуковой волны, в поле стоячей волны и в случае произвольных гармонических осцилляций в отсутствие внешнего воздействия.
6. Результаты исследования относительного движения дисперсных частиц (газовых пузырьков и твердых частиц) в сжимаемой жидкости в поле бегущей и стоячей звуковой волны. Основным результатом этого исследования заключается в том, что в сжимаемой жидкости вследствие радиационного взаимодействия дисперсные частицы могут образовывать связанные состояния. Эти состояния исследованы на устойчивость.
7. Результаты исследования радиационного взаимодействия

классических элементарных частиц в переменных внешних полях.

8. Квантовая теория радиационного взаимодействия элементарных частиц.
9. Выражение для эффективного потенциала взаимодействия двух квантовых зарядов в присутствии электромагнитной волны.
10. Теоретически установленная возможность образования нового вида связанных состояний в системе нескольких квантовых зарядов.
11. Ряд результатов, имеющих непосредственное практическое приложение:
 - решение задачи о коллапсе сферического облака газовых пузырьков в поле низкочастотной звуковой волны в жидкости;
 - результаты исследования дополнительных аспектов задачи о рассеянии низкочастотной звуковой волны на облаке газовых пузырьков;
 - 2 способа акустического контроля газосодержания бетонных смесей при виброформовании.

Апробация работы и публикации. Результаты диссертации докладывались на научных семинарах кафедры теоретической физики БГУ им.В.И.Ленина, НИИ ядерных проблем при БГУ им.В.И.Ленина, ИТМО АН БССР им.А.В.Лыкова, семинаре "Акустика неоднородных сред" Института гидродинамики им.М.А.Лаврентьева СО АН СССР / 1990 /.

Основные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в 22 научных работах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 217 страниц. Библиография содержит 240 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлен обзор основных работ по проблеме воздействия высокочастотных внешних полей различных типов на

малые частицы и радиационного взаимодействия последних. Обоснована актуальность проблемы, новизна решаемых задач, сформулированы цели работы и защищаемые положения, а также кратко изложено содержание глав.

Глава I посвящена учёту сжимаемости жидкости в задаче о радиационном взаимодействии двух газовых пузырьков в поле звуковой волны. В начале главы рассмотрен случай плоской бегущей звуковой волны давления $P_{\text{ext}} = A \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r})$. Полные выражения для силы радиационного взаимодействия на пузырьки имеют вид

$$\vec{F}_{1,2} = \vec{F}_{r1,2} + \frac{A^2 \alpha_{1,2}(\vec{k}\vec{r}_1, \kappa r)}{r^2} \vec{n} + \frac{A^2 \beta_{1,2}(\vec{k}\vec{r}_1, \kappa r)}{r} \vec{n} + \frac{A^2 \gamma_{1,2}(\vec{k}\vec{r}_1, \kappa r)}{r} \vec{k} \quad (I)$$

Здесь $\vec{F}_{r1,2}$ — обычные радиационные силы давления на I-ый либо 2-ой изолированный пузырек. 2-ой член представляет собой "классическую" короткодействующую ($\sim r^{-2}$) силу Бьеркнеса, а 3-ий и 4-ый — дальнедействующие ($\sim r^{-1}$) составляющие соответственно I-го и 2-го типов. Функции $\alpha_{1,2}$, $\beta_{1,2}$ и $\gamma_{1,2}$ осциллирующим образом зависят от фаз $\vec{k}\vec{r}$ и κr . Сумма сил взаимодействия пузырьков (зависящих от \vec{r}) не равна нулю. Объясняется это тем, что при учёте сжимаемости жидкости рассматриваемая система перестает быть замкнутой. Часть количества движения уносится рассеянной волной на бесконечность. К этой задаче оказывается неприемлемым метод лагранжева формализма [3].

Случай стоячей звуковой волны отличается от случая бегущей волны тем, что функции $\alpha_{1,2}$, $\beta_{1,2}$ и $\gamma_{1,2}$ зависят не только от $\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$, но и порознь от \vec{r}_1 и \vec{r}_2 .

В случае произвольной пространственно-неоднородной волны дальнедействующие составляющие 2-го типа направлены по локальным градиентам внешнего звукового поля.

Аналогичные результаты получены для системы нескольких взаимодействующих газовых пузырьков.

В конце главы исследовано относительное движение двух газовых пузырьков поле бегущей и стоячей звуковой волны. Показано, что система двух пузырьков может находиться в таких состояниях, когда расстояние между ними не меняется. Пузырьки образуют связанную пару, перемещаясь в жидкости

как одно целое.

Обнаруженные связанные состояния, отличные от коагуляции, были названы состояниями зависания. Они исследовались на устойчивость. Часть состояний оказались устойчивыми, а часть — нет.

В главе 2 рассмотрены акустические эффекты воздействия переменных электрических полей на жидкие диэлектрики с пузырьками газа. Включение внешнего электрического поля переменной напряженности $\vec{E} = \vec{E}_0 \cos \omega t$ изменяет свободную энергию пузырька $\Delta F \sim E_0^2 (1 + \cos 2\omega t) V$, где V — его объем. Это приводит к тому, что на пузырек воздействует эффективное давление $\Delta P = -\partial(\Delta F)/\partial V$, деформирующее его объем. Указанное давление состоит из двух частей: статической и переменной. Под действием статической части изменяются средние размеры пузырьков, их круговые частоты, газосодержание жидкости и, следовательно, упругие свойства рассматриваемой микроненормальной среды. Под действием переменной части пузырьки совершают монотонные колебания с удвоенной частотой внешнего электрического поля. При этом между ними возникают средние по времени гидродинамические силы взаимодействия только I-го типа. Эти силы содержат короткодействующую ($\sim r^{-2}$) и дальнедействующую ($\sim r^{-1}$) составляющие. Аналогами обычной радиационной силы давления на изолированные пузырьки и дальнедействующей составляющей 2-го типа можно пренебречь ввиду того, что они отличаются от соответствующих сил в звуковой волне малым множителем $c_{ac}/c_{el} \sim 10^{-5}$ (c_{ac} и c_{el} — соответственно скорости звука и света в диэлектрике).

Рассмотрено также излучение звука облаком газовых пузырьков под воздействием переменных электрических полей.

Глава 3 содержит результаты исследования радиационного взаимодействия твердых частиц в сжимаемой жидкости. В начале главы рассмотрен случай гармонических осцилляций частиц в отсутствие внешней звуковой волны. Потенциал скорости жидкости φ записывается в виде суммы двух дипольных потенциалов $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$, создаваемых за счет движения частиц, где $\varphi_j = \sum_{\alpha} a_{j\alpha} \eta_{j\alpha} h_1(\kappa r_j) e^{-i\omega t}$. Неизвестные величины

a_{jd} определяются из граничных условий на поверхности частиц (равенство нормальных составляющих скоростей жидкости и частиц). Учёт сжимаемости жидкости приводит к тому, что сила радиационного взаимодействия твердых частиц (сила Кёнига), наряду с обычным "классическим" короткодействующим ($\sim r^{-4}$) вкладом, содержит три новых вида дальнедействующих составляющих ($\sim r^{-3}$, $\sim r^{-2}$, $\sim r^{-1}$). Результирующие силы зависят от фазы переизлучения $K\Gamma$. Как и в случае взаимодействия газовых пузырьков, сумма сил взаимодействия твердых частиц $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 \neq 0$.

Затем рассмотрены силы Кёнига в поле плоской бегущей звуковой волны. Для того, чтобы не потерять необходимую точность вычислений, каждый из потенциалов ψ_1 и ψ_2 берется в виде суммы трёх членов: монопольного, дипольного и квадрупольного. При этом получаются аналогичные результаты (три новых вида дальнедействующих сил), но каждая из дальнедействующих составляющих теперь уже зависит не только от фазы переизлучения $K\Gamma$, но и фазы запаздывания $\vec{k} \cdot \vec{r}$.

Силы Кёнига в поле стоячей звуковой волны отличаются от сил Кёнига в поле бегущей волн тем, что зависят не только от радиус-вектора $\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$, но и порознь от \vec{r}_1 и \vec{r}_2 .

В конце главы рассмотрено относительное движение твердых частиц в поле бегущей звуковой волны. Показано, что и в случае твердых частиц могут образовываться их связанные состояния, отличные от коагуляции. Эти состояния исследованы на устойчивость.

Глава 4 содержит результаты исследования радиационного взаимодействия классических элементарных частиц в переменных внешних полях. В начале главы рассмотрено радиационное взаимодействие двух классических зарядов, помещенных в поле плоской бегущей электромагнитной волны $\vec{E}_{ext} = \vec{E}_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})$, $\vec{H}_{ext} = \vec{H}_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})$. Здесь \vec{E}_0 и $\vec{H}_0 = [\vec{k}, \vec{E}_0]$ - соответственно векторные амплитуды напряженностей электрического и магнитного поля.

В уравнениях движения зарядов учтено, что на каждый из них, помимо внешнего поля, воздействуют также и рассеянные соседним зарядом волны:

$$m_1 \ddot{\vec{r}}_1 = e_1 (\vec{E}_{ext}(\vec{r}_1, t) + \vec{E}_{r2}(\vec{r}_1, t)) + \frac{e_1}{c} [\dot{\vec{r}}_1, \vec{H}_{ext}(\vec{r}_1, t) + \vec{H}_{r2}(\vec{r}_1, t)]$$

$$m_2 \ddot{\vec{r}}_2 = e_2 (\vec{E}_{ext}(\vec{r}_2, t) + \vec{E}_{r1}(\vec{r}_2, t)) + \frac{e_2}{c} [\dot{\vec{r}}_2, \vec{H}_{ext}(\vec{r}_2, t) + \vec{H}_{r1}(\vec{r}_2, t)] \quad (2)$$

Здесь \vec{E}_{r1} , \vec{H}_{r1} (\vec{E}_{r2} , \vec{H}_{r2}) - напряженности электрического и магнитного полей, переизлучаемых первым (вторым) зарядом, которые должны быть взяты в запаздывающие моменты времени. Для их определения можно воспользоваться выражениями для запаздывающих потенциалов Лиенара-Вихерта. Рассматривается случай только дальней зоны $K\Gamma \gg 1$.

В результате вычисления сил радиационного взаимодействия зарядов оказывается, что они имеют вид (обычные кулоновские силы опущены) :

$$\vec{F}_1 = \frac{e_1^2 e_2^2 (\vec{k} + \vec{k}\vec{n}) (E_0^2 - (\vec{E}_0 \cdot \vec{n})^2)}{2 m_1 m_2 \omega^2 c^2 r} \sin(K\Gamma + \vec{k} \cdot \vec{r}) \quad (3)$$

$$\vec{F}_2 = \frac{e_1^2 e_2^2 (\vec{k} - \vec{k}\vec{n}) (E_0^2 - (\vec{E}_0 \cdot \vec{n})^2)}{2 m_1 m_2 \omega^2 c^2 r} \sin(K\Gamma - \vec{k} \cdot \vec{r}) \quad (4)$$

Как и в случае дисперсных частиц, между зарядами возникают дальнедействующие силы двух типов. Пространственная структура этих сил очень похожа на пространственную структуру сил радиационного взаимодействия дисперсных частиц в сжимаемой жидкости. Это подтверждает общую природу радиационных сил. Как и ранее, сумма $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 \neq 0$.

Рассмотрено влияние поляризации волны на структуру радиационных сил.

Дальнедействующие силы приводят к принципиальной возможности образования связанных состояний даже между одноименно заряженными частицами ввиду того, что на больших расстояниях эти силы могут стать доминирующими по сравнению с кулоновскими. Сравнение дальнедействующих сил с кулоновскими позволяет оценить величину напряженности электрического поля E_0 , при которой эти силы становятся равными: $E_0 \approx m\omega c e^{-1} / \sqrt{K\Gamma}$. Для классических электронов при длине волны $\lambda = 1$ мкм и $K\Gamma = 10$ величина $E_0 = 10^{10}$ в / см. Эта величина близка к атомной напряжен-

ности [4] $E_{\text{кр}} = m^2 c^5 / \hbar^4 = 5 \cdot 10^9$ в/см, но значительно меньше критической напряженности поля $E_{\text{кр}} = m^2 c^3 / e \hbar = 1,3 \cdot 10^{16}$ в/см, при которой происходит нарушение стабильности вакуума [5].

Затем рассмотрено радиационное взаимодействие двух классических магнитных моментов в поле электромагнитной волны. Отличие от случая зарядов, совершающих вынужденные дипольные колебания, заключается в том, что магнитные моменты прецессируют. В уравнениях прецессии учтено их запаздывающее взаимное влияние друг на друга (путем переизлучения волн). Выражения для сил радиационного взаимодействия магнитных моментов имеют точно такую же пространственную структуру, как и (3) - (4).

Построена полуклассическая теория радиационного взаимодействия магнитных моментов (моменты считаются квантовыми, а внешнее поле и поле, рассеиваемое зарядами, - классическим). Для решения этой задачи была использована векторная параметризация Фёдорова Ф.И. группы вращений $O(3)$ [6]. Результаты аналогичны классической теории.

Отношение дальнедействующих радиационных сил к обычным силам статического взаимодействия магнитных моментов определяется параметром $\epsilon = (kr)^3 (\Omega_L / \omega)^2$, где $\Omega_L = \mu_B H_0 / \hbar$, μ_B - магнетон ($\hbar = c = 1$), H_0 - амплитуда вектора напряженности магнитного поля внешней волны. Для спин-спинового взаимодействия электронов при $kr = 1$, $E_0 = 10^{10}$ в/см и $\lambda = 1$ мкм величина $\epsilon \sim 0,15$. Соответствующее значение амплитуды напряженности магнитного поля $H_0 = 2 \cdot 10^8$ Гс значительно меньше критического значения $H_{\text{кр}} = m^2 c^3 / e \hbar = 4,41 \cdot 10^{13}$ Гс, при котором нарушается стабильность вакуума [5].

В конце главы рассмотрено радиационное взаимодействие нерелятивистских частиц в поле скалярной волны $\varphi = A \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})$. При этом также получается, что пространственная структура сил радиационного взаимодействия аналогична (3) - (4).

В главе 5 построена квантовая теория радиационного взаимодействия элементарных частиц в переменных внешних полях.

В начале главы рассмотрено радиационное взаимодействие двух квантовых магнитных моментов. Гамильтониан системы представлен в виде $\hat{H} = \hat{H}_0(t) + \hat{V}$. Невозмущенная часть $\hat{H}_0(t)$ содержит в себе гамильтониан свободных фотонов и взаимодействие магнитных моментов с внешним классическим полем $H_{\text{ext}} = \vec{H}_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})$. В качестве возмущения \hat{V} рассматривается взаимодействие моментов с квантами электромагнитного поля. Оператор \hat{V} является линейной функцией операторов рождения и уничтожения фотонов. Сначала точно решается задача с гамильтонианом $\hat{H}_0(t)$. Затем осуществляется переход к представлению взаимодействия. Амплитуды вероятностей переходов находятся с помощью \hat{S} -матрицы. Во втором приближении теории возмущений по взаимодействию с квантовым полем для той части оператора \hat{S} , которая описывает обмен виртуальным фотоном между частицами, получается выражение, имеющее структуру $\hat{S}_{1,2}^{(2)} = -i T \hat{V}_{1,2}(\vec{r})$, где T - промежуток времени, в течение которого осуществлялось взаимодействие спинов с квантовым полем. Таким образом, имеет место кумулятивный по времени эффект. $\hat{V}_{1,2}(\vec{r})$ можно рассматривать как оператор взаимодействия между частицами. Он является весьма сложной функцией от $\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$, содержащей набор функций Бесселя. Однако в пределе $kr \gg 1$ полученное для $\hat{V}_{1,2}(\vec{r})$ выражение совпадает с результатом предшествующей главы.

Затем изучается радиационное взаимодействие фермионов со скалярным безмассовым квантовым полем. Рассматривается фейнмановская диаграмма (Рис. 1):

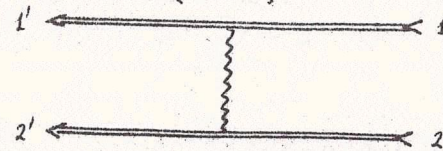


Рис. 1.

Соответствующий матричный элемент записывается в виде

$$S = i f^2 \int d^3 \vec{r}' d^3 \vec{r} dt dt' \mathcal{D}(\vec{r} - \vec{r}', t - t') \bar{\psi}_{p_1}(\vec{r}, t) \psi_{p_1}(\vec{r}, t) \bar{\psi}_{p_2}(\vec{r}', t') \psi_{p_2}(\vec{r}', t') \quad (5)$$

Причем в качестве внешних линий, входящих в (5), необ-

ходимо брать точные решения уравнения Шредингера для частицы во внешнем поле. Если выделить из подинтегральной функции в (5) те члены, которые зависят от разностей $(\vec{r}-\vec{r}', t-t')$ то соответствующий вклад можно представить в виде

$$S = \frac{2\pi c^4}{\Omega} \delta^3(\vec{p}_1 + \vec{p}_2 - \vec{p}_1' - \vec{p}_2') \delta\left(\frac{p_1'^2}{2m} + \frac{p_2'^2}{2m} - \frac{p_1^2}{2m} - \frac{p_2^2}{2m}\right) \tilde{D}(\vec{q}, \omega) \quad (6)$$

"Пространственная" часть функции $\tilde{D}(\vec{q}, \omega)$ (переданный 4-импульс) определяет фурье-образ потенциала взаимодействия частиц в упругом канале (при этом сохраняется суммарный 4-импульс частиц). В обычных координатах для эффективно-го потенциала в квадратичном по полю приближении получается

$$\hat{V}(\vec{r}) = -\frac{1}{4\pi} \left\{ 1 + \frac{2A^2 f^2}{m^2 \omega^4} k_\alpha k_\beta \frac{\partial^2}{\partial x_\alpha \partial x_\beta} \right\} \frac{1}{r} + \frac{f^4 A^2}{8\pi m^2 \omega^4} \cos(\vec{k} \cdot \vec{r}) k_\alpha k_\beta \frac{\partial^2}{\partial x_\alpha \partial x_\beta} \left(\frac{\cos k r}{r} \right) \quad (7)$$

Видно, что наличие внешнего поля ведет к изменению взаимодействия частиц в ближней зоне $k r \ll 1$ и к появлению дальнедействующих сил. Этот же результат может быть достигнут и методами обычной квантовой теории поля, если рассмотреть взаимодействие частицы с полем, в которое включена классическая часть, с точностью до f^4 . Тогда фейнмановские диаграммы, изображенные на Рис. 2, дают в потенциал взаимодействия вклад, совпадающий с (7).

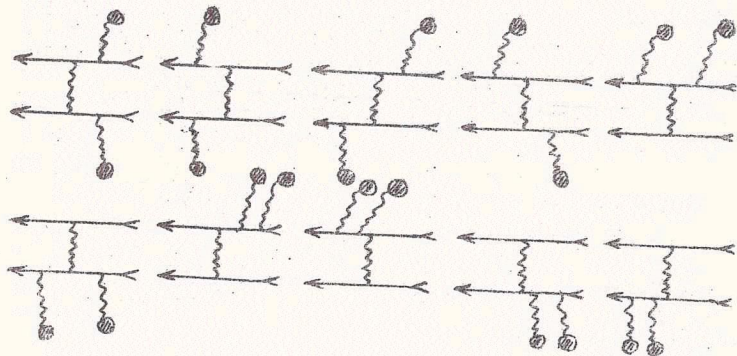


Рис. 2

Следующей задачей является взаимодействие двух квантовых зарядов в поле электромагнитной волны $A_{ext} = \vec{A} \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})$ (\vec{A} - амплитуда векторного потенциала). Рассмотрение ведется аналогичным предыдущему случаю образом. В качестве внешних линий берутся точные решения уравнения Дирака для электрона в поле внешней волны (решения Д.М. Волкова). В квадратичном по полю приближении для потенциала взаимодействия двух зарядов получается ($\hbar = c = 1$)

$$\hat{V}(\vec{r}) = \frac{e_1 e_2}{r} + \frac{e_1 e_2}{4} \left(\frac{e_1^2}{m_1^2} + \frac{e_2^2}{m_2^2} \right) A A_\beta \left(\delta_{\alpha\beta} + \frac{1}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x_\alpha \partial x_\beta} \right) \frac{1}{r} - \frac{e_1^2 e_2^2}{2m_1 m_2} \cos \vec{k} \cdot \vec{r} A A_\beta \left(\delta_{\alpha\beta} + \frac{1}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x_\alpha \partial x_\beta} \right) \frac{\cos k r}{r} \quad (8)$$

Затем получено точное выражение для потенциала взаимодействия двух зарядов в приближении однофотонного обмена (см. Рис. 1). В пределе не слишком сильных полей и когда масса одной из частиц стремится к бесконечности, это выражение переходит в формулу для потенциала Крамерса-Ханнеберга [7]. Последний соответствует водородоподобному атому в поле высокочастотной волны. В отличие от потенциала Крамерса-Ханнеберга построенный в диссертации эффективный потенциал учитывает: релятивистские эффекты, переизлучение зарядами электромагнитных волн, эффект запаздывания во времени при распространении между зарядами волн.

Из-за релятивистских эффектов, в отличие от классической теории, два квантовых электрона не могут образовывать связанную пару в поле внешней электромагнитной волны. Однако оказывается возможным образование нового вида связанных состояний в системе нескольких квантовых зарядов из-за наличия дальнедействующих сил. Примеры таких состояний рассмотрены в конце главы.

Глава 6 несколько выходит за рамки той общей линии, которая проводилась в предыдущих пяти главах, а именно, исследования радиационного взаимодействия в высокочастотных внешних полях, при которых длина волны сравнима с расстоянием между частицами. Поэтому глава помещена в конце диссертации. В ней изучаются ряд особенностей поведения системы дисперсных частиц в жидкости в поле низкочастотной звуковой волны. Т.е. рассматривается случай, когда длина

волны намного превосходит характерное расстояние между частицами. Решена задача о коллапсе сферического облака газовых пузырьков в поле низкочастотной звуковой волны. Исследованы дополнительные аспекты задачи о рассеянии звуковой волны на облаке газовых пузырьков. Предложена 2 способа контроля газосодержания бетонных смесей при виброформовании.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

- I. Завтрак С.Т. К вопросу о поведении облака газовых пузырьков в жидкости в поле звуковой волны давления // Акустический журнал.- 1987.- Т.33, № 1.- С.31-36.
2. Завтрак С.Т. К вопросу о силе взаимодействия Бьеркнеса двух газовых пузырьков в поле звуковой волны // Акустический журнал. - 1987.- Т.33, № 2.- С.240-245.
3. Завтрак С.Т. Рассеяние звуковой волны на облаке газовых пузырьков // Акустический журнал.- 1988.- Т.34, № 1.- С.80-83.
4. Дойников А.А., Завтрак С.Т. Учёт сжимаемости жидкости в задаче о взаимодействии газовых пузырьков в поле звуковой волны // Акустический журнал.- 1988. - Т.34, № 2.- С.246-250.
5. Дойников А.А., Завтрак С.Т. Взаимодействие газовых пузырьков в сжимаемой жидкости // Известия АН СССР, Сер. МЯГ.- 1988.- № 6.- С.99-103.
6. Данилевский Л.Н., Завтрак С.Т., Иванов А.Д. Акустический метод контроля степени уплотнения бетонной смеси при виброформовании // Акустический журнал.- 1989.- Т.35, № 2.- С.365-368.
7. Дойников А.А., Завтрак С.Т. Относительное движение двух газовых пузырьков в сжимаемой жидкости // Акустический журнал.- 1989.- Т.35, № 2. - С.256-259.
8. Завтрак С.Т. Радиационное взаимодействие заряженных частиц в поле электромагнитной волны // Доклады АН БССР.- 1989.- Т.33, № 6.- С.421-423.
9. Завтрак С.Т. Радиационное взаимодействие зарядов // Письма в ЖТФ.- 1989.- Т.15, № 9.- С.14-17.
10. Завтрак С.Т. Радиационное взаимодействие магнитных моментов в поле плоской электромагнитной волны // Письма в ЖТФ.- 1989.- Т.15, № 16.- С.13-16.
11. Завтрак С.Т., Комаров Л.И., Феранчук И.Д. Теория сильной связи частицы и квантового поля с внутренними степенями свободы // Теоретическая и математическая физика.- 1981.- Т.47, № 1.- С.55-66.
12. Завтрак С.Т., Комаров Л.И. Основное состояние статического источника с внутренними степенями свободы, взаимодействующего с квантовым полем // Известия АН БССР. Сер. Физ.- мат. наук.- 1984.- № 4.- С.94-99.
13. А.с. 1546856 СССР, МКИ³ БСОИИ 17/00. Способ контроля уплотнения бетонной смеси / Данилевский Л.Н., Завтрак С.Т., Иванов А.Д. (СССР) - 3 с.
14. Дойников А.А., Завтрак С.Т. К вопросу о рассеянии звуковой волны на облаке газовых пузырьков // Письма в ЖТФ. - 1989.- Т.15, № 15.- С.12-14.
15. Дойников А.А., Завтрак С.Т. Радиационные эффекты взаимодействия двух газовых пузырьков в сжимаемой неидеальной жидкости // Акустический журнал.- 1990.- Т.36, № 3.- С.429-432.
16. Завтрак С.Т. Влияние поляризации на радиационное взаимодействие зарядов в поле электромагнитной волны // Письма в ЖТФ. - 1990. - Т.16, № 3.- С.85-88.
17. Дойников А.А., Завтрак С.Т. Радиационное взаимодействие газовых пузырьков в сжимаемой жидкости в поле неоднородной звуковой волны // Письма в ЖТФ.- 1990.- Т.16, № 5.- С.63-66.
18. Завтрак С.Т., Комаров Л.И. Высоковозбужденный атом в поле электромагнитной волны // Письма в ЖТФ.- 1990.- Т.16, № 15.- С.12-15.
19. Завтрак С.Т., Комаров Л.И. Квантовая теория радиационного взаимодействия частиц в переменном внешнем поле. // Теоретическая и математическая физика.- 1990.- Т.84,

№ 3.- С.431-445.

20. Zavrak S.T. A classical treatment of the long-range radiative interaction of small particles // Journal of Physics A: Math. Gen.-1990.- V.23, No 9.- P.1493-1499.
21. Zavrak S.T. Long-range radiative interaction of magnetic moments in an electromagnetic wave // Journal of Physics A: Math. Gen.-1990.- V.23, No12.- P.1599-1602.
22. Zavrak S.T., Komarov L.I. Quantum theory of the radiative interaction of charged particles // Journal of Physics A: Math. Gen.-1990.- V.23, No23.- P.5547-5553.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Немцов Б.Е. // Письма в ЖФ.-1983.-Т.9, № 14.-С.858-861.
2. Основы физики и техники ультразвука / Агранат Б.А., Дубровин М.Н., Хавский Н.Н., Эскин Г.И.- М.: Высш.шк., 1987.- 352 с.
3. Заболотская Е.А. // Труды ИОФАН СССР.-1989.-Т.18.-С.121-155.
4. Делоне Н.Б., Крайнов В.П. Атом в сильном световом поле. Изд-е 2-е.- М.: Энергоатомиздат, 1984.-224 с.
5. Гитман Д.М., Фрадкин Е.С., Шварцман Ш.М.- В кн.: Квантовая электродинамика с нестабильным вакуумом. - М.: Наука, 1989.- С.3-207 (Труды ФИАН, Т.193).
6. Фёдоров Ф.И. Группа Лоренца.- М.: Наука, 1979.- 384 с.
7. Pont M.// Phys. Rev.A.- 1989.- V.40, No 10.- P.5659-5672.

ВЗ

ЗАВТРАК СЕРГЕЙ ТИМОФЕЕВИЧ

РАДИАЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МАЛЫХ ЧАСТИЦ ВО ВНЕШНИХ
ПОЛЯХ

Подписано к печати 30.01.1991 г. Печать офсетная.
Бесплатно. Формат 60x90 1/16. Объем 1,5 п.л.
Тираж 100 экз. Заказ 54

Институт физики АН БССР, 220602, Минск, ГСП, Ленинский пр., 70
Отпечатано на ротационной машине Института физики АН БССР