

УДК 537.222

О ПРОБЛЕМАХ НЕЛИНЕЙНОЙ АКУСТИКИ, ПРЕДСТАВЛЯЮЩИХСЯ СЕГОДНЯ НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫМИ И ИНТЕРЕСНЫМИ

© 2009 г. Л. А. Островский, О. В. Руденко*

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород; NOAA Earth System Research Laboratory,
E-mail: Lev.A.Ostrovsky@noaa.gov*

**Физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
119991 Москва, Ленинские горы
E-mail: rudenko@acs366.phys.msu.ru*

Поступила в редакцию 18.03.09 г.

Изложен в расширенном виде материал обзорного доклада, сделанного на 18-м Международном симпозиуме по нелинейной акустике (ISNA-18) в июле 2008 года (Стокгольм, Швеция) [1]. Эти результаты частично изложены также в лекциях, прочитанных на 13-й и 12-й научных школах “Нелинейные волны” в Нижнем Новгороде [2, 3]. Цель статьи – кратко рассказать о направлениях развития и достижениях нелинейной акустики, привлекающих повышенное внимание в последние годы.

PACS: 43.25.+Wy

ВВЕДЕНИЕ

Для ответа на вопрос: что же произошло в нелинейной акустике за последние 3–4 года, в каких направлениях эволюционирует в основном эта наука после предыдущего Симпозиума (ISNA-17) – авторы проанализировали доступные им материалы, опубликованные в журналах и трудах конференций, и запросили мнение нескольких ведущих специалистов. Для выбора ключевых проблем использовались различные критерии: 1. Число публикаций по данному направлению. 2. Активность на конференциях (специальные сессии, круглые столы, симпозиумы-сателлиты). 3. Популярность статьи и внимание широкой общественности. 4. Научные программы и гранты.

Из всех направлений, удовлетворяющих этим критериям, отобраны следующие:

1. Явления, связанные с волнами звукового удара. 2. Прогресс в области медицинского ультразвука и биомеханики. 3. Нелинейная акустика в геофизических исследованиях. 4. Развитие идеи “акустического лазера”. 5. Дискуссия о проблеме термоядерного синтеза при акустической кавитации.

Этот выбор, конечно, субъективен, но он может быть полезным для оценки тенденций развития современной нелинейной акустики.

ЗВУКОВОЙ УДАР

Волна звукового удара или N-волна генерируется в атмосфере телами, движущимися со сверхзвуковой скоростью. На расстояниях порядка нескольких характерных длин от обтекае-

мого тела акустическое давление составляют 3–5 кПа (рис. 1). Форма волны определяется аэродинамическим профилем и может быть весьма сложной. Если, например, сверхзвуковой пассажирский самолет движется в однородной среде с постоянной скоростью, то на больших расстояниях волновые фронты становятся конусами Маха. Форма волны во времени при этом асимптотически универсальна и имеет вид двупольного N-импульса. Как и при черенковском излучении электрона, волновое поле концентрируется в конусе с углом при вершине $\alpha = 2 \arcsin(c/U)$, где $c/U < 1$ – отношение скорости звука к скорости полета. Головной и задний фронты N-волны образованы слабыми ударными волнами со скачком давления порядка 100–200 Па.

Качественная картина формирования N-волны на малых расстояниях показана на рис. 2. Сложный ансамбль ударных фронтов возникает вблизи движущегося тела. Каждый фронт соответствует разрыву производной функции, описывающей аэродинамический профиль. В системе отсчета, движущейся вместе с волной со скоростью звука, эти фронты сближаются друг с другом и испытывают парные соударения, подобные соударениям абсолютно неупругих частиц [4]. В промежутках времени между столкновениями происходит нелинейное затухание, подобное “испарению частиц”. В результате многократных столкновений и слияний образуются две “крупные частицы”, соответствующие головному и хвостовому фронтам N-волны. Процессы эволюции профилей и спектров случайных последова-

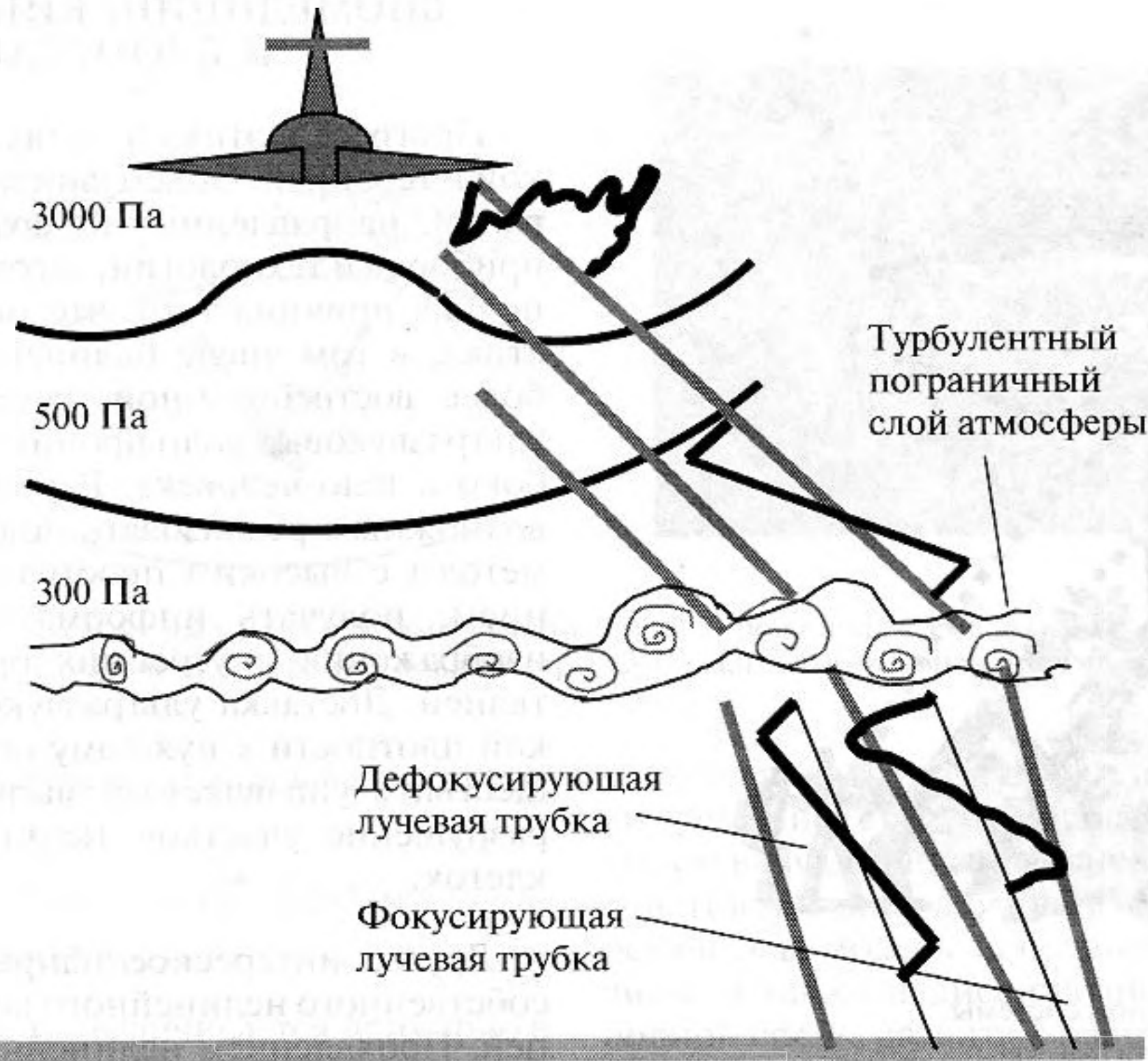


Рис. 1. Волны, возбуждаемые при сверхзвуковом полете.

тельностью разрывных волн часто называют акустической турбулентностью [5].

На форму волны могут сильно повлиять локальные особенности трассы. Например, сильная вихревая турбулентность существует в пограничном слое атмосферы на высотах порядка сотен метров (рис. 1). Она формирует локальные фокусирующие или дефокусирующие неоднородности. В результате ниже этого слоя могут появиться “сверхудары” — импульсы с большими выбросами давления, которые вредно действуют на людей и животных. Наряду с “классической” волной N-образной формы, на местности наблюдаются сглаженные профили, а также импульсные сигналы, содержащие пики, осцилляции и другие проявления случайных неоднородностей трассы. Волны необычной U-образной формы появляются в результате дифференцирования профиля N-волны после прохождения фокальной области или пересечения каустической поверхности.

Однако за механические повреждения ответственно не акустическое давление, а его большие градиенты на ударном фронте. Максимальные градиенты, связанные с шириной ударного фронта, определяются молекулярной релаксацией атмосферных газов, рассеянием и поглощением волны. Все эти явления в настоящее время исследуются. С другой стороны, известны попытки подавить звуковой удар, используя различные

формы фюзеляжа, в том числе экзотические конструкции типа биплана Буземанна. По-видимому, эти попытки не будут успешными, поскольку после исчезновения волн Маха, даже если допустить возможность этого, одновременно упадут как сопротивление движению, так и подъемная сила.

Интенсивные исследования, проводившиеся в России в начале 1990 годов, показали, что более перспективным направлением является не борь-

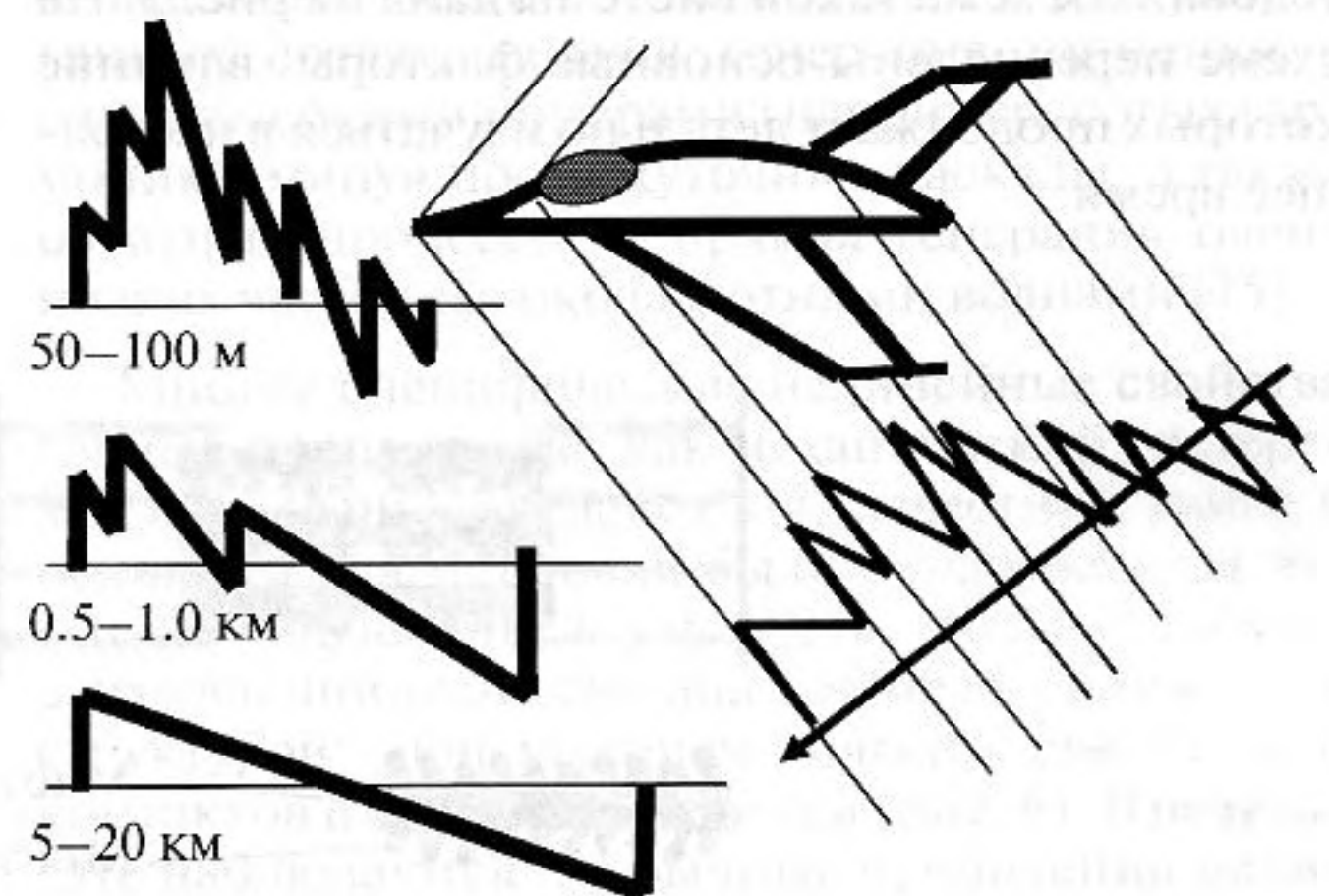


Рис. 2. Формирование N – волны.

БИМЕДИЦИНСКИЙ УЛЬТРАЗВУК И БИОМЕХАНИКА

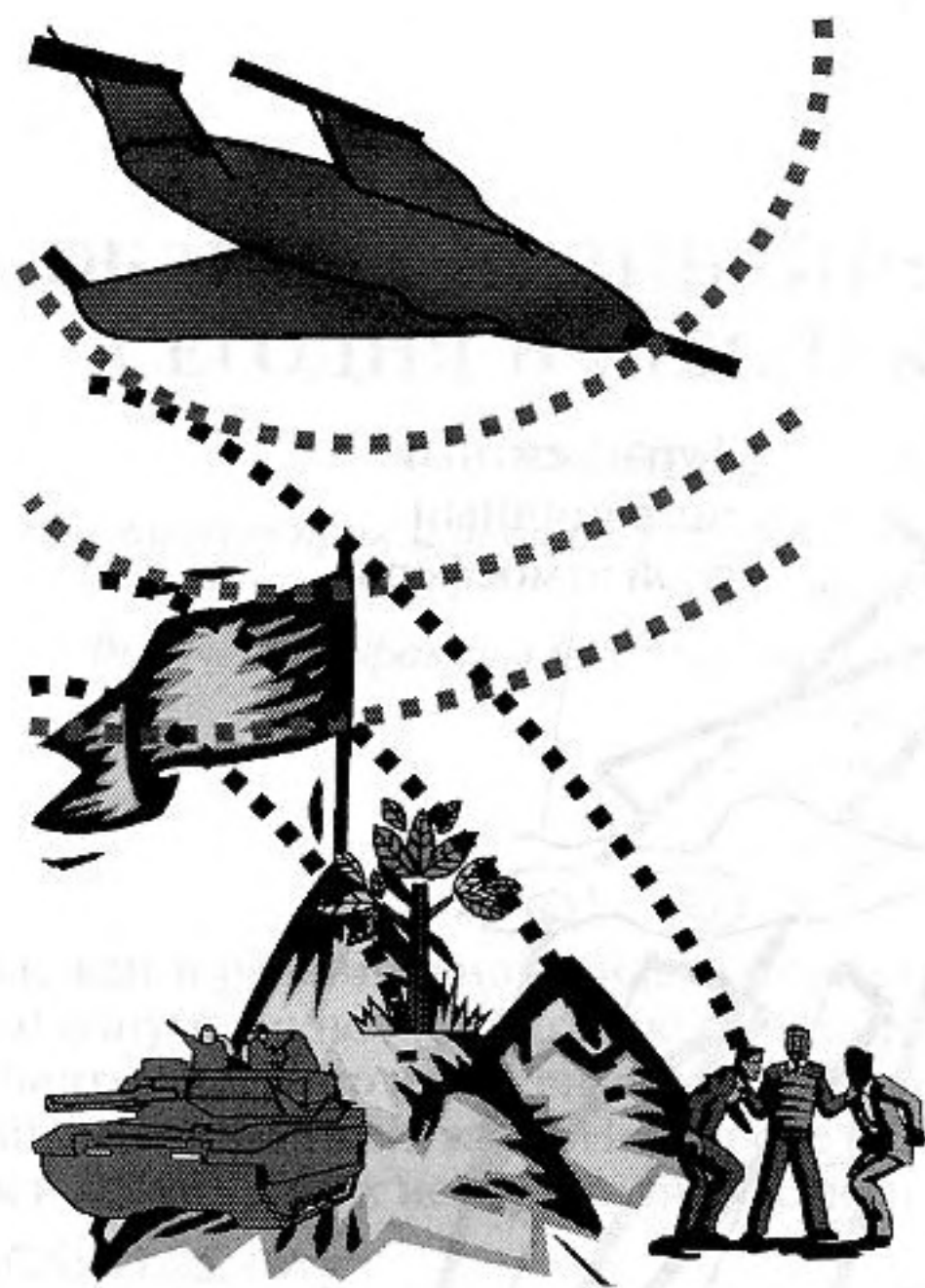


Рис. 3. Схема экспертной системы.

Необходимые для учета факторы:

1. Характеристики полета: скорость, аэродинамика, маневры, маршрут;
2. Атмосфера: стратификация, турбулентность, ветер, влажность, молекулярный состав;
3. Волна: нелинейность, дифракция, рефракция, рассеяние, поглощение, молекулярная релаксация;
4. Свойства местности: рельеф, акустические свойства границ, импульсный отклик, проникновение в океан и грунт через нерегулярную границу раздела;
5. Воздействие на организмы (людей, морских и сухопутных животных), а также строения и технику.

ба со звуковым ударом, а создание экспертной системы для выбора оптимальных режимов и трасс движения сверхзвукового пассажирского самолета в данных конкретных атмосферных и погодных условиях. Схема такой системы дана на рис. 3. На схеме перечислены основные факторы, влияние которых продолжает детально изучаться в настоящее время.

Прогресс в этих областях связан с диагностикой и терапией. Объем финансирования исследований, направленных на создание медицинских приборов и технологий, сегодня очень высок. Основная причина того, что биомедицинская акустика, в том числе нелинейная, становится все более востребованной, состоит в способности ультразвуковых волн проникать сколь угодно глубоко в тело человека. В результате оказывается возможным реализовать новые диагностические методы с высоким пространственным разрешением, получать информативные акустические изображения внутренних органов и структуры тканей. Доставка ультразвуковой энергии высокой плотности к нужному органу позволяет осуществить управляемый нагрев и прецизионное разрушение участков ткани и даже отдельных клеток.

Другое интересное направление — изучение собственного нелинейного поведения живых тканей. Проявлением нелинейности является свойство скелетных мышц поглощать удары, увеличивая вязкость мышцы за счет ее предварительного напряжения, а также защищать скелет, затягивая фронт импульсного воздействия. Это известное явление удалось объяснить лишь недавно. Нелинейная динамика мышцы связана с поведением миозиновых мостиков (рис. 4). Соответствующая математическая модель содержит волновое уравнение и определяющие уравнения, описывающие молекулярную нелинейную динамику мостиков с учетом их реологических свойств.

В работе [6] выведено уравнение для сдвиговых волн в мышце, сокращение волокон в которой происходит вдоль некоторой оси. Из этого уравнения, дополненного уравнениями нелинейной динамики миозиновых мостиков (описываемой, например, хорошо известной в биологии моделью Дешеревского), следует, что эффективная вязкость мышцы при ее статическом напряжении P_S существенно возрастает. На низких ча-

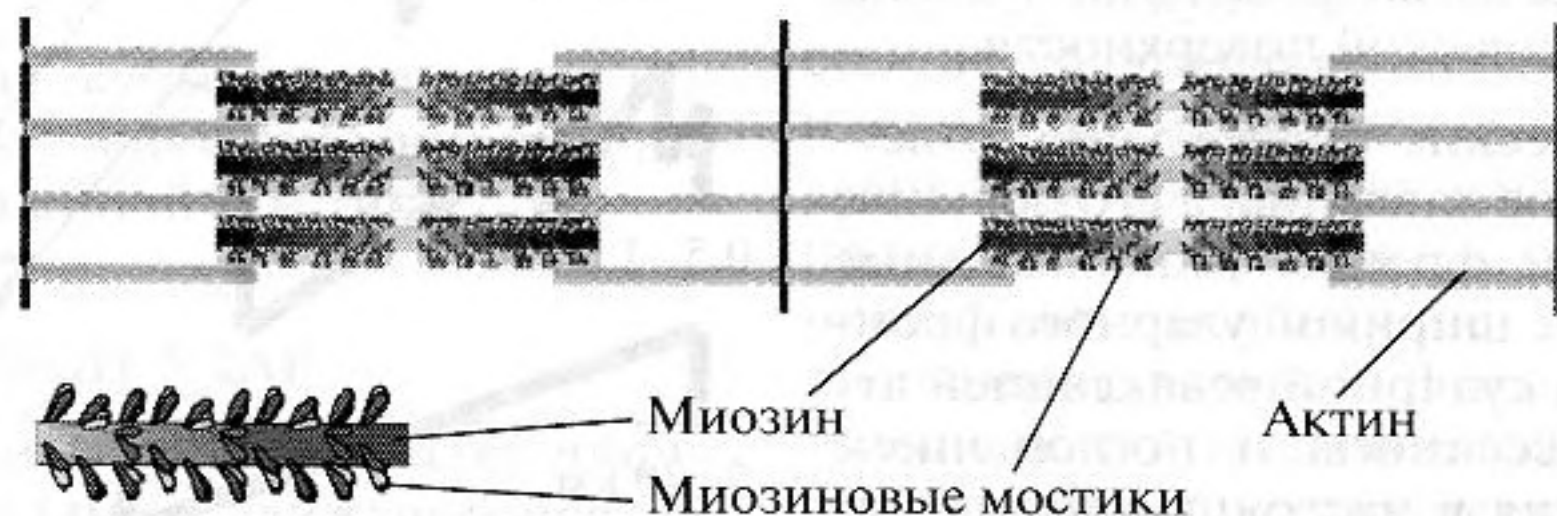


Рис. 4. Структура мышечного волокна.

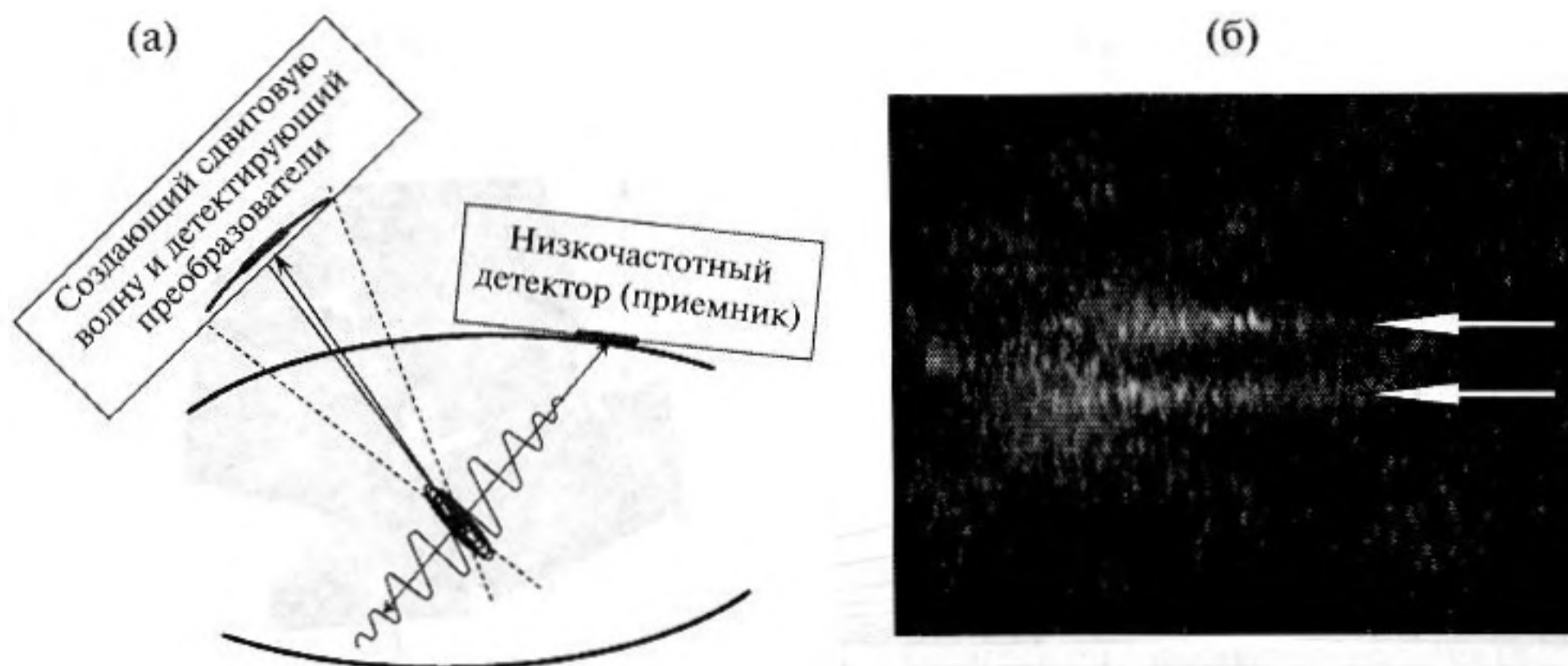


Рис. 5. Генерация сдвиговой волны ультразвуковым пучком [10]. а) Упрощенная схема эксперимента. б) Визуализация сечения цилиндрического сдвигового фронта (показан стрелками) магнитно-резонансным методом.

стотах воздействия вязкость описывается простой формулой

$$\eta = \eta_0(1 + P_S/P_*), \quad P_* \approx 2.5 \times 10^4 \text{ Дин/см}^2, \\ \eta_0 \approx 0.045 \text{ Пуаз.}$$

При $P_S = 1$ атм вязкость увеличивается примерно в $\eta/\eta_0 = 40$ раз, что приводит к усиленному поглощению. Кроме того, мостики “затягивают” реакцию на удар, уменьшая силу его воздействия на скелет.

Нелинейная акустика имеет много биомедицинских приложений, связанных с фокусированным ультразвуком и ударными импульсами. Хорошо известна литотрипсия – неинвазивный метод фрагментации камней в почках и конкрементов в других органах. Фокусированный ультразвук используется в хирургии для разрушения опухолей. Недавно ультразвук стали использовать для гемостаза – остановки кровотечений при травмах внутренних органов. Эти приложения отражены в ряде обзоров, например, [7, 8]. Проблемам медицинской акустики, в том числе и нелинейной, посвящен специальный выпуск Акустического журнала [9].

В биомедицинской акустике возникают нетривиальные физические задачи, связанные с фокусировкой, поведением пузырьков газа в тканях под воздействием акустического поля, нелинейной реологией. В качестве примера укажем на биомедицинские приложения радиационной силы. Одним из них является диагностика с помощью низкочастотных сдвиговых волн, возбуждаемых сфокусированным и модулированным ультразвуком [10, 11]. Благодаря малости сдвигового модуля во многих тканях, сдвиговые смещения в них могут быть достаточно велики (по крайней мере, несколько микрон) для уверенной регистрации и даже визуализации. Основанные на этом явлении методики визуализации сейчас испытываются для медицинских целей. При этом нередко используется предварительное сжатие

ультразвукового импульса с помощью обращения во времени [12]. Стоит отметить также “сверхзвуковую визуализацию”, основанную на генерации сдвиговой волны движущимся фокусом [13]. Теоретическая модель для сдвиговой диссипативной силы, а также недиссипативной силы в неоднородной среде, развита в работе [14]. На рис. 5 показаны принцип эксперимента и фронт генерируемой сдвиговой волны [10].

НЕЛИНЕЙНАЯ АКУСТИКА В ГЕОФИЗИКЕ

Подъем исследовательской активности в этой области идет примерно с 1999 года. Интересные результаты получены при нелинейных испытаниях геологических и реологических структур. Гигантская нелинейность структурно неоднородных твердых тел является физической основой высокой чувствительности методов нелинейной диагностики. Недавно был развит ряд теорий, объясняющих появление высокой нелинейности. Наблюдались “нетипичные” нелинейные явления, сопровождающие распространение волн в геоструктурах. Среди них – существование так называемых “доминантных” частот в гранулированных средах, прямая генерация гармоник с очень высокими номерами (например, сотых гармоник), минуя промежуточные каскады, а также обратные процессы – прямая генерация очень низких частот высокочастотными волнами [15].

Многие специфические нелинейные свойства горных пород, такие, как механический гистерезис и медленная релаксация, известные ранее в основном для металлов, были обнаружены и частично объяснены в последние годы. Природа этих явлений тесно связана с их мезоскопической структурой: присутствием мягких связей или контактов и жесткой матрицей (рис. 6). В результате наблюдаются необычные проявления нелинейных эффектов. Так, благодаря гистерезисной зависимости напряжения от деформации, сдвиг

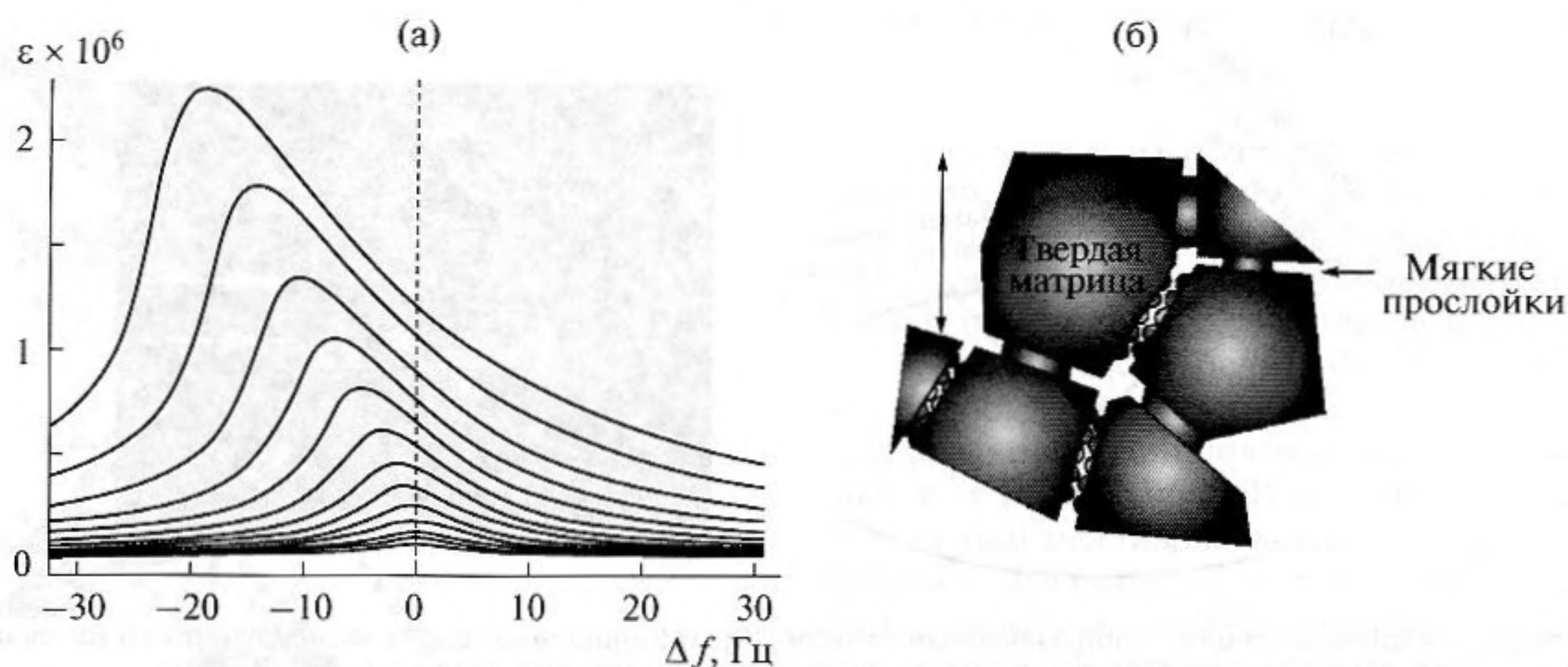


Рис. 6. а) Типичные нелинейные резонансные кривые для образца песчаника, при различных амплитудах колебаний [19]. б) Схема гранулированной структуры, объясняющая нелинейность горных пород наличием мягких прослоек (контактов, трещин) в твердой матрице.

резонансной частоты является линейной (а не квадратичной) функцией амплитуды, а третья гармоника оказывается пропорциональной квадрату (а не кубу) амплитуды на основной частоте. Для таких материалов наблюдается сильная релаксация (“медленная динамика”) с характерными временами от десятков секунд до нескольких часов. Обзору достижений в этой области посвящены статьи [15–18]. Этим вопросам был также посвящен специальный выпуск Акустического журнала [19] и книга [20].

Исследования последних лет включают развитие методов обнаружения противопехотных мин [21], анализ взаимодействия встречных волн в гистерезисных средах [22, 23], реологические структурные модели [24] и многие другие (например, [25]).

Предпринимались попытки применить модели структурной нелинейности к объяснению геофизических явлений, связанных с землетрясениями. Например, согласно гипотезе [26], удаленные афтершоки объясняются “размягчением” материала после каждого сейсмического события за счет “медленной” релаксации, причем упругие модули среды не успевают восстановить свои исходные значения между толчками; кроме того, почва каждый раз становится все более деформируемой.

АКУСТИЧЕСКИЙ “МАЗЕР”, “САЗЕР”, “УАЗЕР”

Этот и следующий разделы посвящены направлениям, потенциальная реализуемость и прикладная значимость которых все еще не ясны. Однако они представляются интересными и в принципе могут стать очень важными в будущем.

Наряду с изобретением когерентных квантовых устройств, таких, как лазеры и мазеры, работа которых основана на вынужденном излучении фотонов, были предложены и реализованы классические электронные приборы. Мазеры на циклотронном резонансе, гиротроны и другие “классические” приборы преобразуют энергию некогерентных колебаний электронов в когерентное излучение. Кажется вполне логичным исследовать аналогичные принципы в акустике.

Теоретический анализ проблемы был начат в 1980-х годах [27]. Он был основан на модели ансамбля связанных нелинейных монополей, резонансная частота которых зависит от амплитуды. Распространение когерентной волны через среду со случайно распределенными осцилляторами может сопровождаться ее подавлением или усилением в зависимости от характера связи между осцилляторами. Другая схема включает нестационарное (импульсное) возбуждение с последующим импульсным излучением когерентной компоненты на стадии свободных нелинейных колебаний [27, 28]. Теория основана на рассмотрении коллективных мод линеаризованной системы; только для одной моды все N осцилляторов колеблются в фазе, что соответствует когерентному полю. Случайно возбужденная система может быть неустойчивой по отношению к этой когерентной моде. Заметим, что этот процесс также имеет электромагнитный аналог — так называемое “сверхизлучение”, вынужденное излучение движущихся частиц, рассматриваемое в астрофизике. Другая идея состояла в получении “лазерного” эффекта в системе с переохлажденным паром [29]. (Заметим, что эффекты “сазера” на основе гармонической накачки с фиксированной фазой, рассмотренные теоретически [30], скорее аналогичны вынужденному рассеянию в оптике, но не

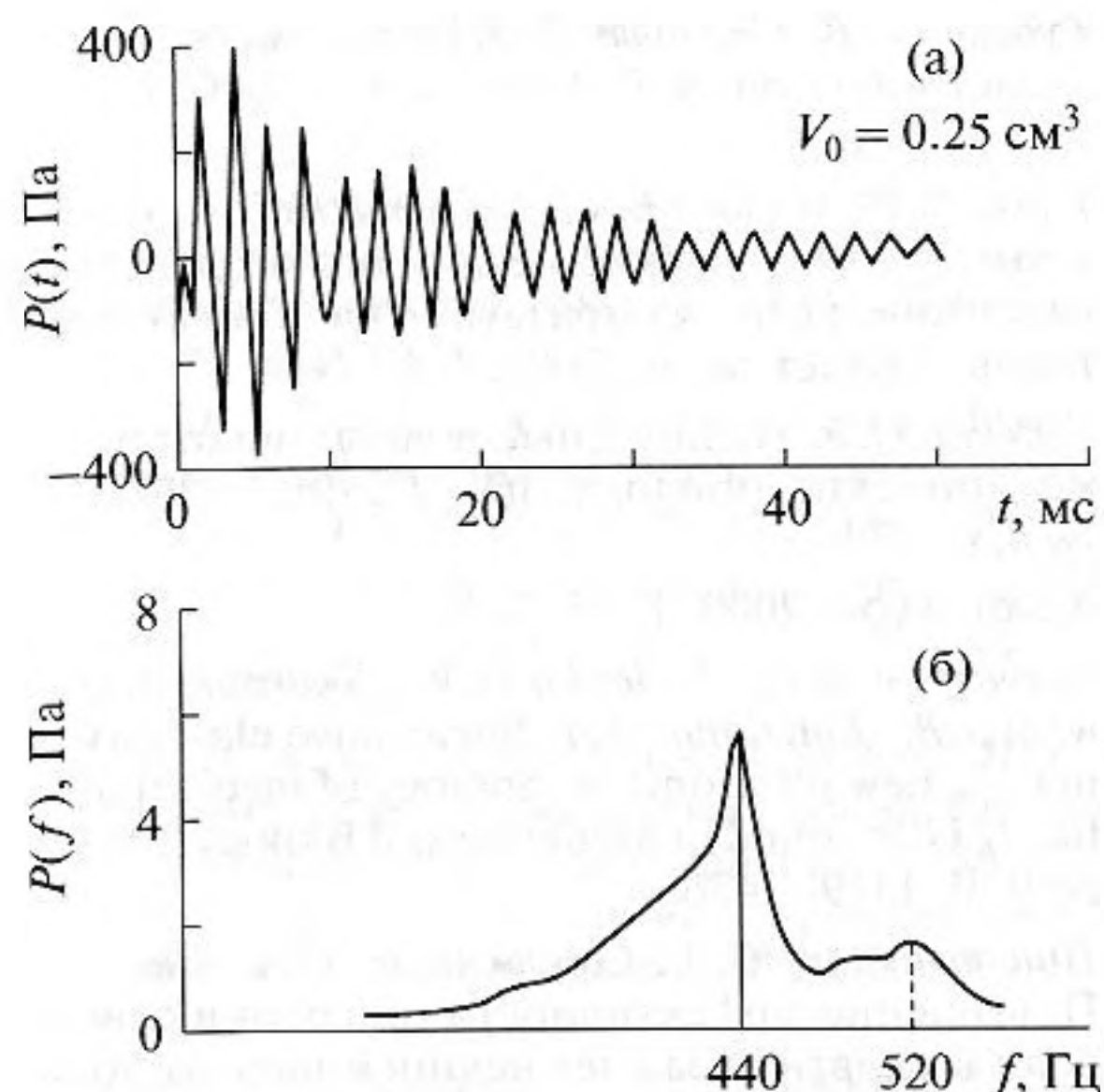


Рис. 7. Временная запись (а) и спектр (б) излучения двух полостей, возбужденных в противофазе вблизи направления дипольного излучения. Пик на частоте 440 Гц отвечает монополярным колебаниям, возбужденным при самосинхронизации [31].

лазерному эффекту, поскольку последний существенно связан с превращением некогерентного излучения в когерентное.)

Эксперименты по самосинхронизации в акустике были выполнены с взаимодействующими газовыми пузырьками и с искусственными пузырьками в виде двух или трех управляемых полостей в кювете с водой [31]. Две полости вначале возбуждались в противофазе (вторая мода) и слабо излучали в воду по дипольному механизму. Благодаря самосинхронизации эта мода становилась неустойчивой и генерировалась синфазная мода, излучавшая много сильнее, по монополярному механизму (рис. 7).

Другой, недавний “полу-акустический” пример — автосинхронизация трех транзисторных электронных генераторов благодаря механической связи через упругий алюминиевый стержень [32]

Описанные выше “игрушечные” эксперименты служат пока лишь иллюстрацией рассмотренного эффекта. Действительно, существующие генераторы звука и ультразвука и без того достаточно когерентны, так что “лазерный” акустический эффект, казалось бы, не так актуален, как в оптике. Однако самосинхронизация классических осцилляторов может иметь свои нетривиальные приложения. Более того, в последнее время все больше обсуждается идея твердотельного квантового “сазера”, способного генерировать когерентные фононы в терагерцевом диапазоне. Наряду с теорией получены предварительные, но

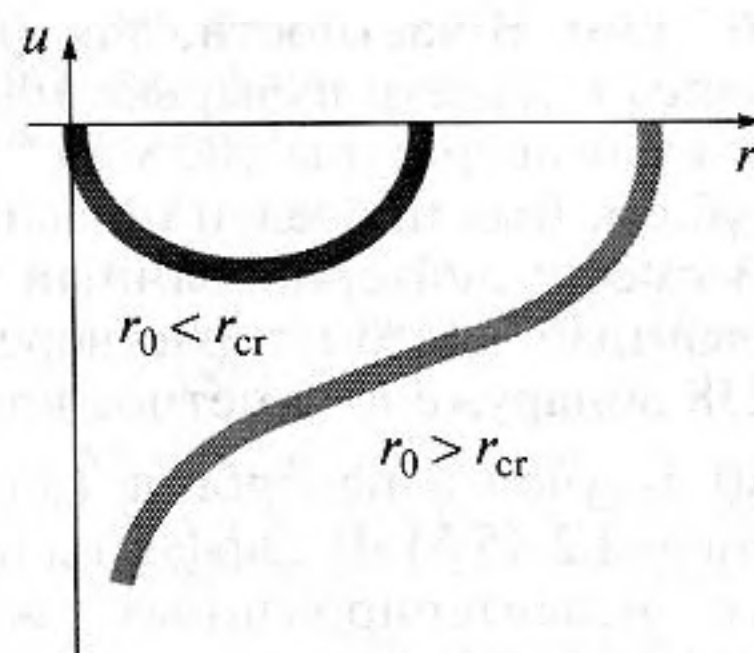


Рис. 8. Зависимость скорости поверхности схлопывающегося пузырька от его радиуса [42].

обнадеживающие экспериментальные результаты [33–35].

“СОНОФЬЮЖН”

Название раздела связано с новым термином, обозначающим проблему акустического термоядерного синтеза. Попытки достижения экстремально высоких температур в коллапсирующем кавитационном пузырьке стали широко известными с 2002 года, после сенсационных экспериментов, описанных в [36]. Но гораздо раньше этой проблемой уже занимались довольно активно, а сама идея неоднократно патентовалась [37–39]. Известны ранние публикации, в которых ставилась и более скромная цель — получить гамма- и рентгеновское излучение прежде, чем дело дойдет до нейтронов.

Важные результаты относительно предельно достижимых давлений и температур в коллапсирующем пузырьке получены Е.И. Забабахиным. Они описаны в книге [40] и обзоре [41]. История этих работ интересна как сама по себе, так и для будущих исследований. Как было показано в [40, 41] (см. также [42]), неограниченная кумуляция может быть остановлена вязкостью, если только исходный радиус пузырька в воде не превышает критического значения $r_{cr} = 0.8$ мкм (рис. 8). Однако Я.Б. Зельдович, И.М. Гельфанд, К. Хантер и другие показали, что и сжимаемость не может остановить кумуляцию. Таким образом, максимальные достижимые значения давления и температуры в центре пузырька все еще достоверно неизвестны. Е.И. Забабахин сформулировал гипотезу: “Всякая неограниченная кумуляция неустойчива; неустойчивость не только видоизменяет ее, но и устраняет вообще (из неограниченной делает ограниченной)... Это соображение интуитивно”.

Чтобы проследить за дискуссией вокруг этой проблемы, можно посмотреть на недавние публикации. В работе [43] проведен детальный численный расчет с ответами на критику идеи и первого

эксперимента [36]. В частности, для финальной стадии коллапса (диаметр пузырька 100 нм) расчет дает оценку температуры 100 млн °С и плотность 10 г/куб.см. Был проведен новый эксперимент [44]. В смеси: дейтерированный бензол + дейтерированный ацетон с растворенной солью урана-238 обнаружено заметное возрастание эмиссии гамма-лучей и нейтронов (до 10^4 в секунду) с энергией 2.45 МэВ. Эффекты исчезали в контрольных недеийтерированных жидкостях, при отсутствии кавитации и в тяжелой воде. Дополнительные данные по “акустическому термояду” изложены в книге [45]. Этот вопрос остается дискуссионным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Здесь кратко описаны некоторые проблемы, интересные, по крайней мере, с точки зрения авторов. Каждый из разделов может быть существенно расширен добавлением других важных работ и большим списком статей, опубликованных в последние годы. Поскольку в рамках краткого обзора этого сделать нельзя, мы пользовались советами многих наших коллег как в процессе отборе материала, так и при определении оптимальной формы для его сжатого представления. В трудах Международного симпозиума по нелинейной акустике ISNA-18 содержатся статьи по многим подчеркнутым выше проблемам. Между нашим оригинальным докладом на ISNA-18 и появлением этой статьи пройдет больше года. За этот период, безусловно, должны появиться важные новые результаты как в отмеченных нами — [46], так и в новых перспективных направлениях. Тем не менее, мы надеемся, что этот краткий обзор не утратит полностью своей актуальности и, возможно, будет интересен достаточно большому кругу читателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ostrovsky L.A., Rudenko O.V.* What Problems of Nonlinear Acoustics Seem to be Important and Interesting Today? In Book: *Nonlinear Acoustics – Fundamentals and Applications*. P. 9–16. Am. Inst. of Physics. Melville, New York. 2008.
2. *Руденко О.В.* Актуальные проблемы, связанные с нелинейной акустикой. В книге: *Нелинейные волны*. 2006. С. 151–169. Н. Новгород. Изд. ИПФ РАН. 2007.
3. *Островский Л. А.* Неклассическая нелинейная акустика. В книге: *Нелинейные волны 2004*. С. 109–124. Н. Новгород. Изд. ИПФ РАН. 2005.
4. *Руденко О.В., Гурбатов С.Н., Хедберг К.М.* Нелинейная акустика в задачах и примерах. М.: Физматлит, 2007. 176 с.
5. *Гурбатов С.Н., Руденко О.В., Саичев А.И.* Волны и структуры в нелинейных средах без дисперсии. М.: Физматлит, 2008. 496 с.
6. *Руденко О.В., Сарвазян А.П.* Волновая биомеханика скелетной мышцы // *Акуст. журн.* 2006. Т. 52. № 1. С. 720–732.
7. *Бэйли М.Р., Хохлова В.А., Сапожников О.А., Каргл С.Г., Крам Л.А.* Физические механизмы воздействия терапевтического ультразвука на биологическую ткань // *Акуст. журн.* 2003. Т. 49. № 4. С. 437–464.
8. *Руденко О.В.* Нелинейные волны: некоторые биомедицинские приложения // *УФН*. 2007. Т. 177. № 4. С. 374–383.
9. *Акуст. журн.* 2009. Т. 55. № 4.
10. *Sarvazyan A.P., Rudenko O.V., Swanson S.D., Folkwes J.B., Emelianov S.Y.* Shear wave elasticity imaging – a new ultrasonic technology of medical diagnostics // *Ultrasound in Medicine and Biology*. 1998. V. 24. № 9. P. 1419–1436.
11. *Пищальников Ю.А., Сапожников О.А., Синило Т.В.* Повышение эффективности генерации сдвиговых волн в желатине за счет нелинейного поглощения сфокусированного ультразвукового пучка // *Акуст. журн.* 2002. Т. 48. № 2. С. 253–259.
12. *Fink M.* Time-reversal acoustics // *Journal of Physics: Conference Series*. 2008. V. 118. 012001.
13. *Gennisson J.-L., Rénier M., Catheline S., Barrière C., Bercoff J., Tanter M., Fink M.* Acoustoelasticity in soft solids: Assessment of the nonlinear shear modulus with the acoustic radiation force // *J. Acoust. Soc. Amer.* 2007. V. 122. № 6. P. 3211–3219.
14. *Ostrovsky L., Sutin A., Il'inskii Yu., Rudenko O., Sarvazyan A.* Radiation force and shear motions in inhomogeneous media // *J. Acoust. Soc. Amer.* 2007. V. 121. № 3. P. 1324–1331.
15. *Руденко О.В.* Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики // *УФН*. 2006. Т. 176. № 1. С. 77–95.
16. *Guyer R.A., Johnson P.A.* Nonlinear mesoscopic elasticity: Evidence for a new class of materials // *Phys. Today*. 1999. V. 52. P. 30–35.
17. *Ostrovsky L.A., Johnson P.A.* Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials // *Riv. Nuovo Cimento*. 2001. V. 24. № 7. P. 1–46.
18. *Pasqualini D., Heitmann K., TenCate J.A., Salman Habib S., Higdon D., Johnson P.A.* Nonequilibrium and nonlinear dynamics in Berea and Fontainebleau sandstones: Low-strain regime // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. B01204.
19. *Акуст. журн.* 2005. Т. 51. Приложение № 1 (спецвыпуск).
20. *Назаров В.Е., Радостин А.В.* Нелинейные волновые процессы в упругих микронеднородных средах. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2007.
21. *Korman M., Sabatier J.* Nonlinear acoustic techniques for landmine detection // *J. Acoust. Soc. Amer.* 2004. V. 116. № 6. P. 3354–3369.
22. *Ostrovsky L.A.* Wave interaction in acoustic resonators with and without hysteresis // *Acoust. Soc. Amer.* 2004. V. 116. № 6. P. 3348–3353.
23. *Gusev V.* On the interaction of counterpropagating acoustic waves in resonant rods composed of materials

- with hysteretic quadratic nonlinearity // *J. Acoust. Soc. Amer.* 2005. V. 117. № 4. P. 1850–1857.
24. *Зайцев В.Ю., Назаров В.Е., Таланов В.И.* “Неклассические” проявления микроструктурно-обусловленной нелинейности: новые возможности для акустической диагностики // *УФН*. 2006. Т. 176. № 1. С. 97–101.
 25. *Есинов И.Б., Рыбак С.А., Серебряный А.Н.* Нелинейная акустическая диагностика земных пород и океана // *УФН*. 2006. Т. 176. № 1. С. 102–107.
 26. *Johnson P., Jia X.* Nonlinear dynamics, granular media and dynamic earthquake triggering // *Nature*. 2005. V. 437. P. 871–874.
 27. *Кобелев Ю.А., Островский Л.А., Соустова И.А.* Автосинхронизация нелинейных осцилляторов в акустике. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1986. Т. 29. С. 1129–1135; Нелинейная модель автофазировки классических осцилляторов // *ЖЭТФ*. 1991. Т. 99. № 2. С. 470–480.
 28. *Ostrovsky L.A., Soustova I.A.* Phase-locking effects in a system of nonlinear oscillators // *Chaos*. 1991. V. 1. № 2. P. 224–231.
 29. *Комюсов А.Н., Немцов Б. Е.* Акустический “лазер” // *Акуст. журн.* 1991. Т. 37. № 1. С. 123–129.
 30. *Zavtrak S.* Acoustical laser with mechanical pumping // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1996. V. 99. № 2. P. 730–733.
 31. *Bredikhin V.V., Kobleev Yu.A., Vasilinenko N.I.* Auto-phasing of free volume oscillations of air cavities in water // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1998. V. 103. № 4. P. 1775–1786.
 32. *Weaver R.L., Lobkis O.I., Yamilov A.* Entrainment and stimulated emission of ultrasonic piezoelectric auto-oscillators // *J. Acoust. Soc. Amer.* 2007. V. 122. № 6. P. 3409–3418.
 33. *Camps I. Makler S.S., Pastawski H.M., Foa Torres L.E.F.* GaAs-Al_xGa_{1-x}As double-barrier heterostructure phonon laser: A full quantum treatment // *Phys. Rev. B*. 2001. V. 64. P. 125311.
 34. *Kent A.J., Kini R.N. Stanton N.M., Henini M., Glavin B.A., Kochelap V.A., Linnik T.L.* Acoustic Phonon Emission from a Weakly Coupled Superlattice under Vertical Electron Transport: Observation of Phonon Resonance // *Phys. Rev. Lett.* 2006. V. 96. P. 215504.
 35. *Tilstra L.G., Arts A.F.M., de Wijn H.W.* Optically excited ruby as a saser: Experiment and theory // *Phys. Rev. B*. 2007. V. 76. P. 024302.
 36. *Taleyarkhan R.P., West C.D., Cho J.S., Lahey Jr. R.T., Nigmatulin R.I., Block R.C.* Evidence for Nuclear Emissions During Acoustic Cavitation // *Science*. 2002. V. 295. P. 1868–1873.
 37. *Flynn H.G.* Method of Generation of Energy by Acoustically Induced Cavitation Fusion and Reactor Therefore. United State Patent 4,333,796 (Jun. 8, 1982).
 38. *Маргулис М.А.* Способ получения ВТ плазмы и осуществления термоядерных реакций. Патент РФ № 2045715. 1997.
 39. *Станюкович К.П., Хаврошкин О.Б.* Явление рентгеновского излучения кавитационной полостью. Госкомизобретений. Заявка на открытие, ОТ № 8576 от 28.09.1973; Явление возникновения импульсной термоядерной реакции в ядре схлопнувшейся кавитационной полости в обычной воде. Госкомизобретений. Заявка на открытие, ОТ № 8589 от 22.10.1973.
 40. *Zababakhin E., Zababakhin I.* Unlimited Cumulation Phenomena (Ed. Ya.B. Zeldovich). Moscow: Nauka, 1990. 176 p.
 41. *Забабихин Е.И.* Явления неограниченной кумуляции. В сборнике: *Механика в СССР за 50 лет*. М.: Наука, 1970. Кумуляция энергии и ее пределы // *УФН*. 1965. Т. 85. № 4. С. 721–726.
 42. *Кедринский В.К.* Гидродинамика взрыва. Эксперимент и модели. Новосибирск: СО РАН, 2000. 456 с.
 43. *Nigmatulin R.I., et al.* Theory of Supercompression of Vapor Bubbles and Nanoscale Thermonuclear Fusion // *Physics of Fluids*. 2005. T. 17. P. 107106.
 44. *Taleyarkhan R.P., Nigmatulin R.I., et al.* Nuclear Emission during Self-Nucleated Acoustic Cavitation // *Phys. Rev. Letters*. 2006. V. 96. P. 034301.
 45. *Смородов Е.А., Галиахметов Р.Н., Ильгамов М.А.* Физика и химия кавитации. М.: Наука, 2008. 228 с.
 46. *Walker P.M.* Terahertz acoustic oscillations and stimulated phonon emission in an optically pumped superlattice // *Phys. Rev. B*. 2009. V. 79. № 24. P. 245313.