

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова

---

Физический факультет

Исследование акустического поля, создаваемого в воде  
пучком электронов с энергией 50 МэВ

Курсовая работа студента 413 группы  
Афанасьева Андрея Анатольевича

Научный руководитель:  
кандидат физико-математических наук Широков Е.В

Москва, 2007 г.

## Оглавление

1. Введение.....	3
2. Регистрация нейтрино.....	4
2.1. Черенковский метод.....	6
2.2. Акустический метод.....	7
2.3. Преобразование энергии частиц в акустическую энергию.....	8
2.4. Спектр сигнала. Затухание звука в воде.....	11
3. Гидрофоны.....	13
3.1. Пьезоэлектрические гидрофоны.....	13
3.2. Оптоволоконные гидрофоны.....	13
4. Проекты нейтринных телескопов.....	17
4.1. NEMO.....	18
5. Эксперименты по исследованию акустического поля.....	21
5.1. Эксперимент BNL.....	21
5.2. Эксперимент на ускорителе электронов в ИЯИ.....	22
5.3. Эксперимент на пучке протонов в ИТЭФ.....	23
5.4. Эксперимент НИИЯФ.....	24
5.5. Результаты эксперимента НИИЯФ.....	26
6. Заключение.....	31

## 1. Введение

Детектирование нейтрино высоких энергий играет уникальную роль в решении задач современной космологии. Это связано с тем, что нейтрино обладают очень малым сечением взаимодействия с веществом и не имеют электрического заряда, а следовательно, не меняют своей траектории из-за магнитных полей в космосе. Поэтому нейтрино могут доносить информацию от более удаленных объектов и с большей точностью, чем протоны и фотоны.

Возможные источники нейтрино высоких энергий – это:

- активные галактические ядра (AGN);
- взрывы сверхновых;
- остаточное свечение сверхновых.

На рисунке 1 приведены спектры нейтрино от различных источников.

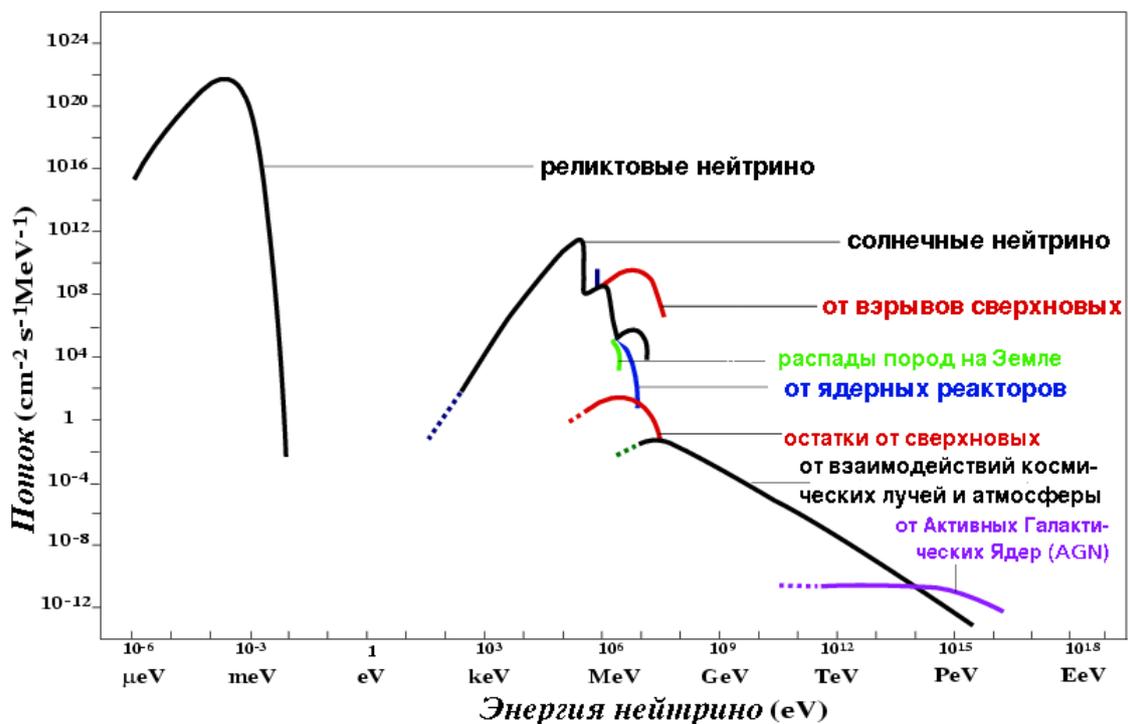


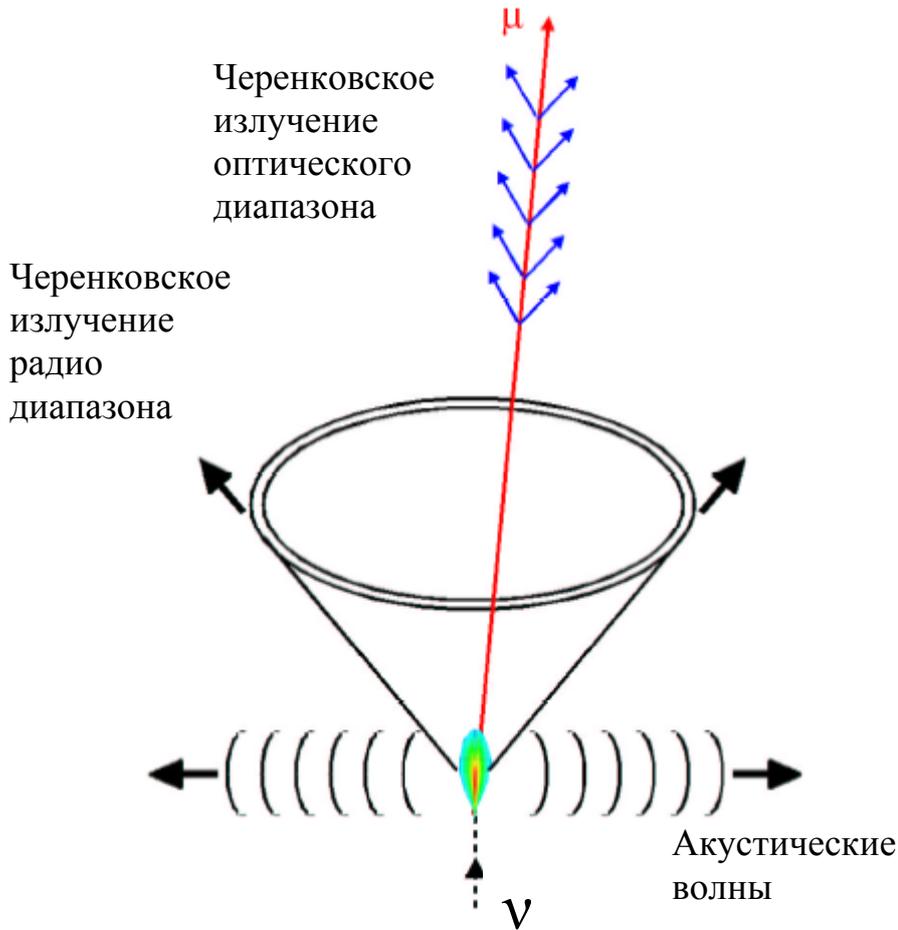
Рис. 1. Зависимость потока нейтрино от их энергии для различных источников.

В атмосфере Земли также образуются нейтрино и мюоны высоких энергий в результате реакций с участием космических частиц. Они являются нежелательным фоном при детектировании астрофизических нейтрино. Один из способов его снижения – это погружение детекторов на большую глубину, а также направленный прием черенковского излучения ФЭУ. Как показывают измерения, фон от атмосферных мюонов на глубине в 3000 м в воде снижается примерно в 100 раз.

В работе Гайссера, Хальцена и Станева [1] предсказан поток в 3 мюона в год с поверхности в  $1 \text{ км}^2$ , образованных нейтрино и летящих из недр Земли, с энергиями, большими 1 ТэВ. При энергиях больших 100 ТэВ число астрофизических нейтрино должно превосходить число атмосферных нейтрино. Такие свойства фона, а также малые потоки нейтрино накладывают ограничения на размеры детектора, а также указывают на необходимость в измерении направления и энергии нейтринных мюонов.

## **2. Регистрация нейтрино**

Методы регистрации нейтрино сверхвысоких энергий ( $E > 10^{15} \text{ эВ}$ ) основаны на том, что с ростом энергии нейтрино возрастает сечение его взаимодействия с веществом. Для таких нейтрино Земля является непрозрачной. Поэтому возможна глубоководная регистрация нейтрино, которые проходят сквозь Землю и взаимодействуют в толще воды, образуя заряженные лептоны и каскадные ливни. На данный момент существует три метода детектирования нейтрино сверхвысоких энергий. Все они основаны на различных процессах, происходящих при взаимодействии нейтрино с веществом детектора (рис. 2).



*Рис. 2. Схематическое изображение происходящих в веществе процессов при взаимодействии нейтрино с атомом вещества.*

Первый метод основан на эффекте Черенкова-Вавилова. При взаимодействии нейтрино с веществом может образоваться заряженный лептон соответствующего аромата, обладающий высокой энергией, который будет двигаться в веществе со скоростью, превышающей скорость света в этом веществе. В таком случае лептон будет испускать излучение Черенкова-Вавилова в оптическом диапазоне. Направление излучения определяется коэффициентом преломления вещества, в котором движется заряженная частица, и образует конусообразный фронт. Черенковское излучение можно зафиксировать фотоэлектронными умножителями и, учитывая геометрию распространения излучения, восстановить трек частицы [2].

Второй метод заключается в регистрации звуковых волн, которые возникают в воде при распространении адронных ливней.

Третий метод основан на регистрации радиоволн, испущенных электромагнитным ливнем. Если рожденный нейтрино лептон является электроном, то он рождает электромагнитный ливень. В 1962 году знаменитым советским физиком Аскарьяном было предположено, а два года спустя экспериментально доказано, что электромагнитный ливень испускает когерентное излучение радиодиапазона 0.1–1 ГГц. Условием когерентности является размер области испускания (диаметр ливня), который должен быть меньше длины волны испущенного сигнала. Таким образом, системой детекторов радиоволн можно зарегистрировать развитие электромагнитного ливня и его направление [3].

В данной работе будут рассмотрены лишь первые два метода, поскольку они используются в настоящее время при создании нейтринных телескопов. Однако, третий метод также является многообещающим.

### **2.1. Черенковский метод**

Для регистрации нейтрино высокой энергии используются мюоны, получающиеся в результате реакции  $\nu_\mu (\bar{\nu}_\mu) + N \rightarrow \mu^\pm + X$ , где  $N$  – нуклоны,  $X$  – другие продукты реакции (главным образом  $\pi$ ,  $K$ -мезоны). Эти мюоны, в отличие от незаряженных нейтрино, излучают черенковский свет, который и регистрируется ФЭУ.

Излучение черенковского света происходит, когда скорость света в веществе  $c/n$ , где  $n$  – показатель преломления среды, оказывается меньше, чем скорость частицы пролетающей в этой среде. Механизм возникновения черенковского излучения объясняется когерентным излучением диполей, возникающих в результате поляризации атомов или молекул среды под влиянием движущейся в ней заряженной частицы. Под действием электрического поля пролетающей заряженной частицы электронное облако атома смещается относительно ядра. Атом поляризуется. После удаления частицы из данной области атом возвращается в нормальное состояние. Переход атома в нормальное состояние сопровождается излучением. На самом же деле прохождение заряженной частицы через вещество не всегда сопровождается

электромагнитным излучением. Если частица движется в среде сравнительно медленно, то поляризационный эффект, вызванный частицей в каждый данный момент времени, оказывается сферически симметричным относительно положения частицы. В этом случае излучение поляризованного атома будет гаситься излучением, испускаемым в противоположной фазе симметричным ему атомом.

По теории Тамма-Франка частица испускает свет во всем диапазоне. На самом же деле, диапазон излучения будет ограничен эффектами дисперсии и поглощения света веществом. Черенковский свет собирается ФЭУ, которые чувствительны к свету в ограниченном диапазоне.

Для телескопа важно не только зарегистрировать то, что частица пересекла объем детектора, но также нужно определить угол, под которым она пролетела через детектор, т.к. это важно для снижения фона (фоновые мюоны летят из атмосферы, а мюоны от нейтрино высоких энергий вылетают из земной коры), а также для идентификации источника в космосе. Для восстановления трека частицы используется большое число ФЭУ, которые работают на совпадение событий по времени. При определенном числе сработавших ФЭУ в какой-то области детектора начинается реконструкция трека.

Недостатком черенковского метода является сложность достижения большого объема детектора, который необходим, поскольку потоки нейтрино сверхвысоких энергий очень малы. Так как длина поглощения света составляет  $\sim 20-40$  м, для эффективной работы детектора необходимо очень большое количество ФЭУ.

## **2.2. Акустический метод**

Альтернативным методом регистрации нейтрино сверхвысоких энергий является акустический метод, состоящий в регистрации акустического сигнала от каскадных ливней, инициированных нейтрино в воде. Основным преимуществом акустического метода перед черенковским является возможность достижения больших объемов регистрации при меньшей стоимости установки. Детекторы звуковых колебаний, гидрофоны, могут располагаться на большем расстоянии друг от

друга, чем черенковские детекторы (ФЭУ). Это связано с тем, что расстояние, на которое может распространяться звук с частотой 10 кГц в воде, составляет порядка нескольких километров, в то время как интенсивность черенковского излучения на расстоянии 40 метров от трека составляет лишь один фотон на регистрирующую поверхность ФЭУ (диаметром 24,5 см).

Первые исследования непосредственно радиационно-акустических эффектов относятся к 50–60-м годам. В 1955 году, например, Д. Глэзер и Д. Рам [4] сообщили о наблюдении частиц в метастабильной вскипающей жидкости в пузырьковой камере по звуковым (вибрационным) сигналам, возникающим в результате рождения и эволюции пузырьков на треках частиц. Г.А. Аскарьян в 1957 году рассмотрел возбуждение ультразвуковых и гиперзвуковых волн заряженными частицами в плотных средах вследствие локальных перегревов и рождения микрополостей [5]. В 1963 году Р. Уайт наблюдал генерацию звука пучком электронов в твердом теле [6]. Многочисленные исследования возбуждения звука проникающим излучением были выполнены, главным образом, учеными СССР и США в 70-80-е годы. В 1977 году Г.А. Аскарьян и Б.А. Долгошеин показали возможность регистрации нейтрино высокой энергии по акустическому импульсу от адронного ливня, рожденного на большой глубине. Была дана численная оценка амплитуды возникающего давления, подтверждающая осуществимость регистрации [7].

### **2.3. Преобразование энергии частиц в акустическую энергию**

При поглощении излучения в среде происходит выделение теплоты. Поскольку частицы распространяются в среде со скоростью, близкой к скорости света, то с точки зрения акустики в ограниченной области пространства практически мгновенно создается зона разогрева. Тепловая энергия частично преобразуется в энергию звуковых волн: поскольку жидкость расширяется при нагревании, в зоне разогрева создается область повышенного давления, которая и порождает акустическую волну. Такой механизм генерации звука носит название терморadiационного. К настоящему моменту он является наиболее изученным. Большое число работ, в том числе эксперименты на ускорителях, показали, что именно этот механизм является доминирующим механизмом генерации звука проникающим излучением в воде.

Необходимо подчеркнуть, что мы рассматриваем ситуацию, когда полное энерговыделение в процессе прохождения частиц в среде имеет величину  $E \leq 10^{15}$  эВ. Лишь при таких больших значениях энерговыделения возможна уверенная регистрация акустического сигнала, когда его уровень существенно превышает уровень шума. Такое энерговыделение достигается на ускорителях при большой интенсивности пучка протонов или электронов. Оно соответствует энергии, которая выделяется в каскаде, образованном нейтрино сверхвысокой энергии.

Нейтрино высоких энергий в основном взаимодействует с веществом посредством неупругого рассеяния на адронах. Получивший энергию адрон рождает адронный ливень. При увеличении энергии нейтрино возрастает и сечение взаимодействия нейтрино с веществом. Для нейтрино с энергией  $10^{21}$  эВ пробег в воде составляет порядка 100 км. После первого взаимодействия энергия нейтрино распределяется между ядром и лептоном. В среднем лептон получает около 80% всей энергии. Оставшаяся энергия идет на развитие адронного ливня в воде, направление которого совпадает с направлением движения провзаимодействовавшего нейтрино (рис.3) [8]. Объем воды вдоль оси адронного ливня подвергается нагреванию и расширяется, производя акустический импульс,

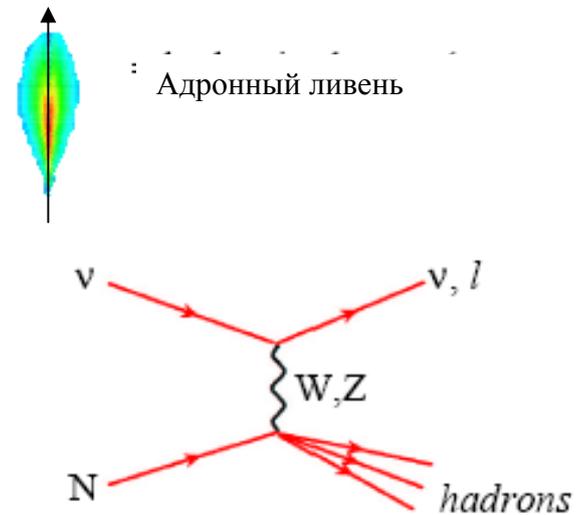


Рис. 3. Схематическое изображение развития адронного ливня и диаграмма Фейнмана реакции взаимодействия нейтрино с ядром.

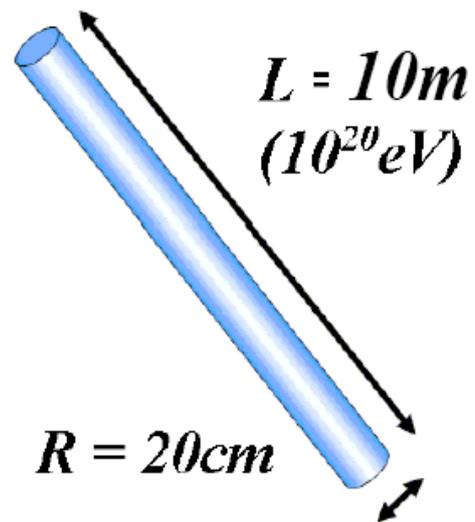
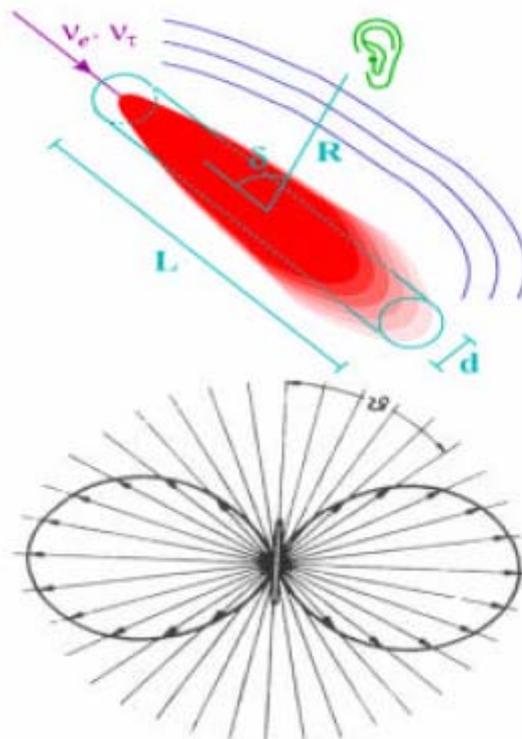


Рис. 4. Размеры области, занимаемой адронным ливнем, инициированным нейтрино с энергией  $10^{20}$  эВ в воде.

адронного ливня в воде, направление которого совпадает с направлением движения провзаимодействовавшего нейтрино (рис.3) [8]. Объем воды вдоль оси адронного ливня подвергается нагреванию и расширяется, производя акустический импульс,

который распространяется перпендикулярно оси ливня. В случае с нейтрино, обладающим энергией  $10^{20}$  эВ, 99% всей энергии адронного ливня заключено в объеме цилиндрической формы с радиусом 20 см, и длиной 10 м (рис. 4). Как говорилось выше, акустический сигнал от адронного ливня имеет определенную геометрическую форму в пространстве.



Область распространения сигнала является сильно сплюснутым цилиндром, ось которого совпадает с осью распространения адронного ливня (рис. 5). Высота такого цилиндра приблизительно равна длине ливня, а радиус определяется расстоянием распространения звуковых волн в веществе:  $\sim 10$  км для воды (рис. 6). Это делает регистрацию и

Рис. 5. Схематическое изображение области распространения акустического сигнала, возникшего от расширения перегретого цилиндрического объема жидкости развивающимся в веществе адронным ливнем.

последующую обработку данных более простыми.

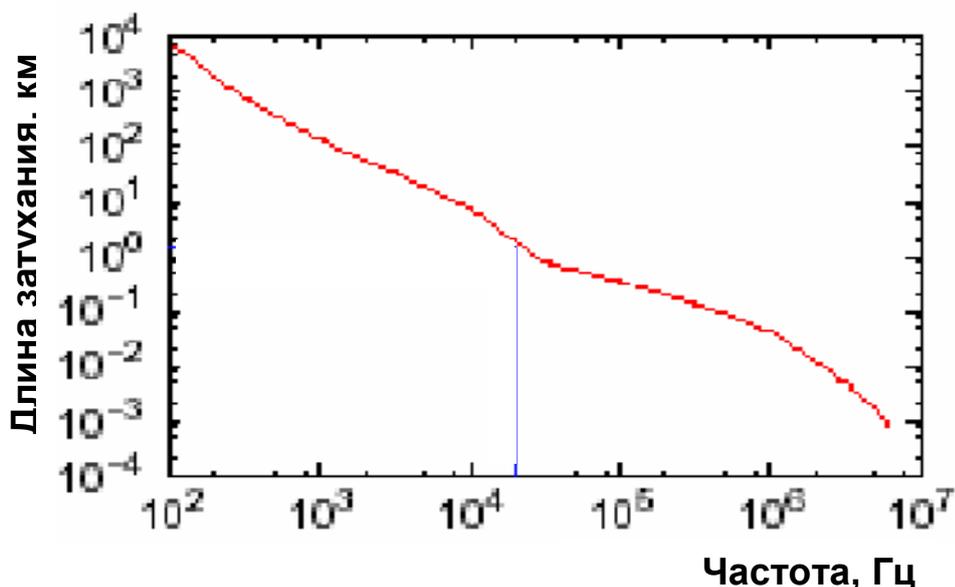
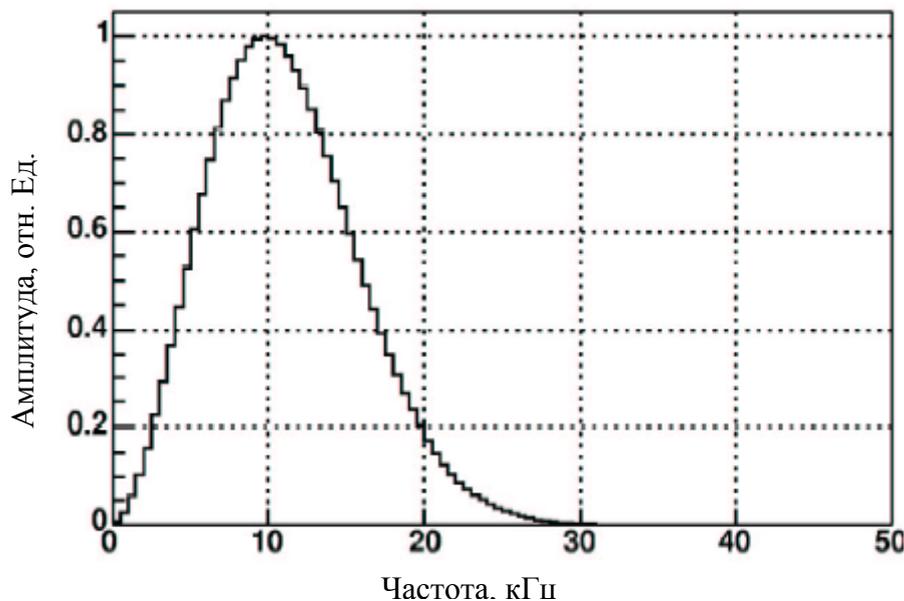


Рис. 6. Зависимость длины затухания звукового сигнала в воде от его частоты.

Таким образом, область распространения звука хорошо описывается фигурой цилиндрической формы на расстоянии 10 км. Расстояние, на которое распространяется звук в веществе, зависит от частоты акустического сигнала.

#### **2.4. Спектр сигнала. Затухание звука в воде**

При рассматриваемых значениях энерговыделения спектр акустического сигнала лежит в интервале от 1 до 100 кГц. На рисунке 7 показан спектр акустического сигнала от адронного ливня с энергией  $10^{20}$  эВ в зависимости от частоты, рассчитанный в рамках проекта SAUND [9]. Максимум интенсивности сигнала приходится на частоту 10 кГц. Для электронно-фотонных каскадов максимум должен смещаться в область более высоких частот.



*Рис. 7. Зависимость относительной интенсивности сигнала от частоты.*

Расстояние, на которое распространяется звуковой сигнал в воде, зависит от его частоты. На рис. 8 представлена зависимость длины затухания звука от частоты. Видно, что сигнал с частотой  $\sim 10$  кГц проходит в морской воде расстояние порядка 10 км.

Из графика также следует, что низкие частоты распространяются дальше, чем высокие. Поэтому спектр сигнала на больших расстояниях будет искажаться,

смещаясь в область низких частот. Эту особенность распространения звука в воде нужно учитывать при реконструкции событий в детекторе.

Для регистрации адронных ливней акустическим методом необходимо в толще морской (озерной) воды расположить в определенном порядке гидрофоны. Гидрофон должен быть способным регистрировать звуковые сигналы на частотах в области 10 кГц, и работать на глубинах  $\sim 1-2$  км. Порядок расположения важен для последующего восстановления положения адронного ливня в пространстве. Координаты и направление гидрофонов, зарегистрировавших сигнал, а также время регистрации сигнала являются входными данными для программ реконструкции событий.

Расстояние между гидрофонами тоже необходимо выбирать исходя из нескольких факторов. С одной стороны, увеличивая расстояние между гидрофонами, при одинаковом количестве устройств (при той же стоимости проекта) можно добиться повышения объема, а, следовательно, и количества регистрируемых событий. С другой стороны, существует верхний предел расстояния между гидрофонами, который накладывает длина затухания акустического сигнала в воде. В этом случае весь детектор будет регистрировать одиночные сигналы, которые в процессе обработки будет сложно отличить от шумовых сигналов.

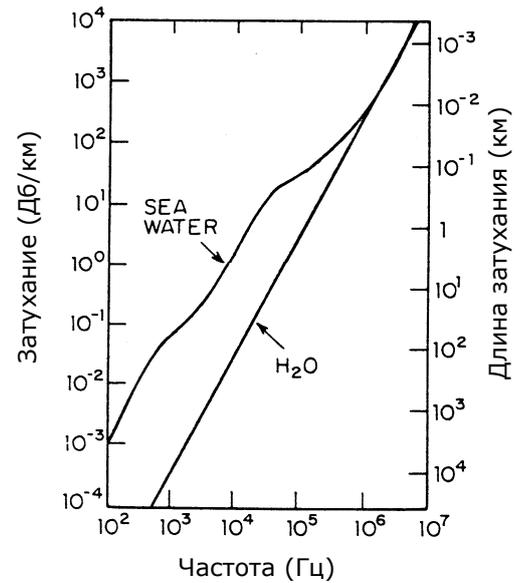


Рис. 8. Зависимость длины затухания звука от его частоты.

## **3. Гидрофоны**

### **3.1. Пьезоэлектрические гидрофоны**

В основе работы пьезоэлектрических гидрофонов лежит пьезоэлектрический эффект: под действием внешнего механического напряжения материал приобретает электрическую поляризацию, то есть на его поверхностях появляются связанные электрические заряды разных знаков. Пьезоэффект наблюдается в анизотропных диэлектриках, преимущественно в кристаллах, в которых отсутствует центр симметрии, а также в некоторых поликристаллических диэлектриках, имеющих упорядоченную структуру – например, в керамике. В отличие от монокристаллов пьезокерамика более дешева и проста в изготовлении.

В пьезоэлектрическом гидрофоне создаются напряжения с мгновенными амплитудами, которые прямо пропорциональны амплитудам акустических волн, воздействующих на гидрофон. Гидрофоны на основе пьезокерамики являются простыми в изготовлении, чувствительными и недорогими. Чувствительность высококачественных современных гидрофонов на основе пьезокерамики может составлять до 1 В/Па в полосе частот 2-100 кГц.

Принципиальными их недостатками являются:

- шум  $1/f$ , обусловленный электронным преобразователем;
- существенная амплитуда теплового шума;
- очень затруднено и очень дорого создание больших массивов таких гидрофонов на больших расстояниях (так называемое мультиплексирование).

### **3.2. Оптоволоконные гидрофоны**

Преимущества оптоволоконных гидрофонов состоят в том, что они:

- имеют более высокую чувствительность;
- имеют широкий динамический диапазон (способность детектировать

очень маленькие динамические напряжения в присутствии больших статических напряжений);

- электрически пассивны, то есть не требуют присутствия электроники в непосредственной близости от датчика;
- устойчивы к электромагнитным помехам;
- дают возможность измерений по всей длине оптоволоконна, а не только с помощью датчика на конце оптоволоконна;
- очень удобны для мультиплексирования.

Поскольку оптический сигнал может передаваться с помощью оптоволоконна на значительные расстояния, возможно создание больших удаленных массивов акустических датчиков. На одном оптоволоконном канале может размещаться много гидрофонов. Такие массивы не требуют перевода светового сигнала в электрический для каждого датчика в отдельности, что существенно уменьшает стоимость всего детектора.

Принципиальная схема работы оптоволоконного гидрофона заключается в наблюдении интерференционной картины двух отраженных импульсов лазерного излучения. Для создания интерференционной картины используются два лазерных импульса, следующие друг за другом через интервал  $\tau$ , равный времени прохождения одного импульса по всей длине оптоволоконна в гидрофоне в оба конца. В линии оптического волокна находятся два зеркала Брегга, расположенные перед гидрофоном и на конце линии после гидрофона (рис. 9).

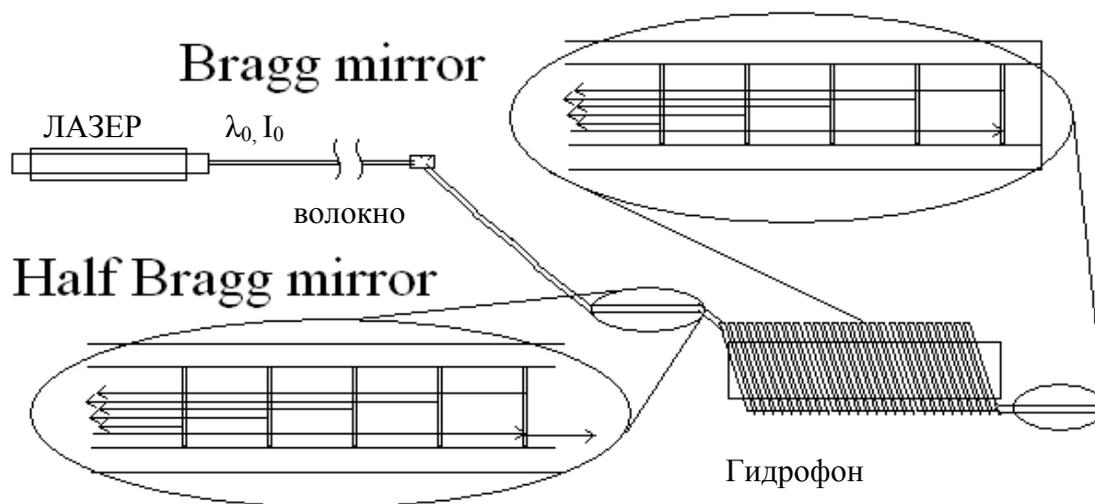


Рис. 9. Схематическое изображение линии оптического волокна в оптоволоконном гидрофоне с парой зеркал Брегга.

Каждый из импульсов отражается дважды, но интерференционная картина получается из импульса А, отраженного зеркалом 2, и импульса В, отраженного зеркалом 1 (рис. 10). Вначале два разделенных по времени импульса А и В подаются на вход линии оптоволоконна (рис. 10а). Импульс А, пройдя зеркало 1 с коэффициентом отражения  $< 0.5$ , попадает в обмотку гидрофона, отраженный при этом сигнал  $A_{ref1}$  поступает на светодиод (рис. 10б). Пройдя обмотку гидрофона, импульс А вновь частично отражается от зеркала 2, прошедший дальше по линии сигнал может быть использован, если в линии не один гидрофон (рис. 10в). Отраженный сигнал от первого импульса  $A_{ref2}$ , после выхода из обмотки гидрофона и зеркала 1 интерферирует с отраженным на зеркале 1 сигналом В (рис. 10г). Пройшедший дальше по линии В сигнал также может быть использован при наличии в линии других гидрофонов (рис. 10д). В этом случае интерференционная картина будет содержать больше пиков.

Звуковая волна в воде создает область повышенного давления  $\sim 60$  мПа. Под действием давления деформируется упругий корпус гидрофона и изменяется длина оптического волокна. Сдвиг фаз прямо пропорционален длине оптического волокна [10]. Измеряя сдвиг фаз, мы можем найти амплитуду акустической волны.

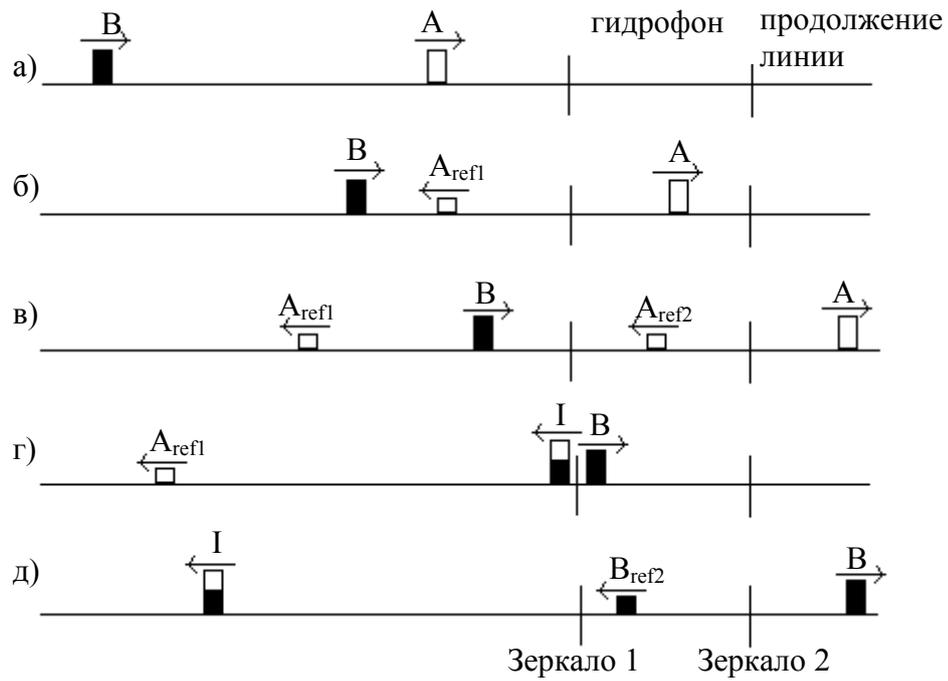
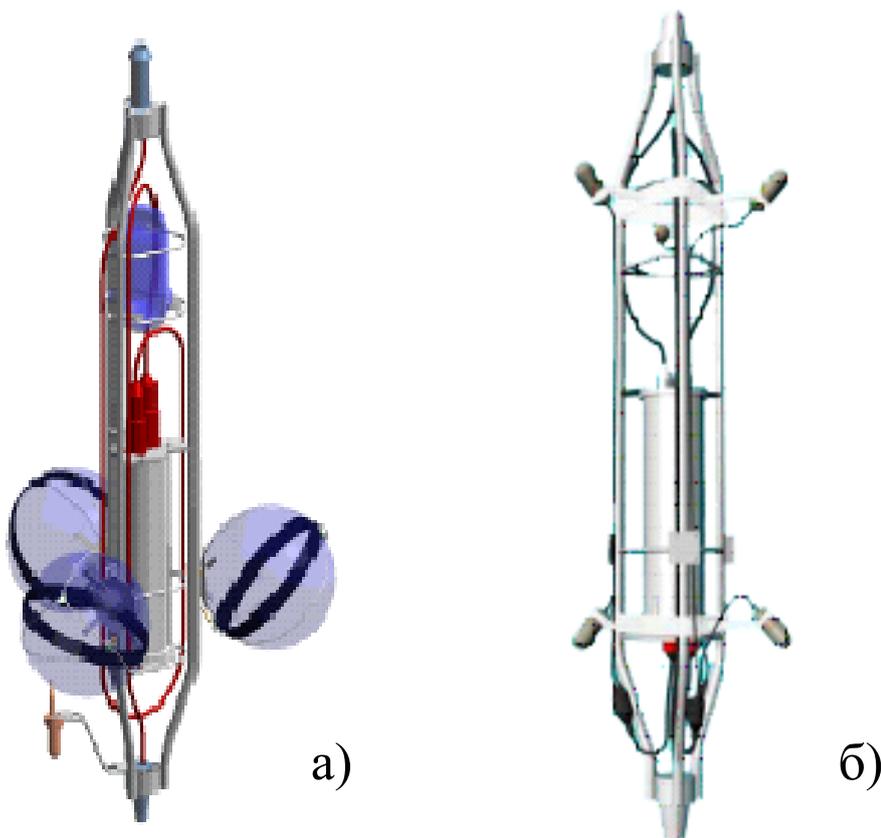


Рис. 10. Этапы прохождения двух световых импульсов по каналу оптоволоконна с встроенным гидрофоном и зеркалами.  $A$  и  $B$  начальные импульсы,  $A_{refl1}$ ,  $A_{refl2}$ ,  $B_{refl1}$  – отраженные импульсы от первого и второго зеркала соответственно,  $I$  – результат интерференции импульсов  $A_{refl2}$  и  $B_{refl1}$  (на рисунке не указан).

#### 4. Проекты нейтринных телескопов

На сегодняшний день существует ряд нейтринных телескопов (действующих и строящихся), использующих черенковский метод регистрации нейтрино. Это проекты ANTARES (Toulon, Франция), БАЙКАЛ (озеро Байкал, Россия), NEMO (Capo Passero, Италия), AMANDA/ICE CUBE (Антарктида), NESTOR (Pylos, Греция). Некоторые из этих детекторов будут использовать помимо черенковского метода регистрации еще и акустический. Так как методы взаимно независимы, то нет препятствий для совмещения акустической и оптической аппаратуры в одной установке.

На рисунке 11 изображены конструкции детектора ANTARES с оптическими модулями (рис. 11а) и с гидрофонами (рис. 11б).



*Рис. 11. Изображение элементарных конструктивных единиц детектора (кластеров) с оптическими модулями а) и с гидрофонами б).*

#### 4.1. NEMO

Обсудим подробнее проект NEMO, как наиболее перспективный с точки зрения использования акустического метода регистрации нейтрино. Планируемое месторасположение: в 80 км на юго-восток от самой южной точки Сицилии – Саро Passero (рис. 12). Это место обладает очень хорошими свойствами:

- высокая прозрачность воды (длина поглощения света – в среднем 70м);
- минимальные подводные течения ( $\sim 3$  см/с,  $\max < 15$  см/с);
- измеренные нормы отложения осадка и нормы загрязнения низки;
- близко к порту, международному аэропорту, лабораториям (LNS).

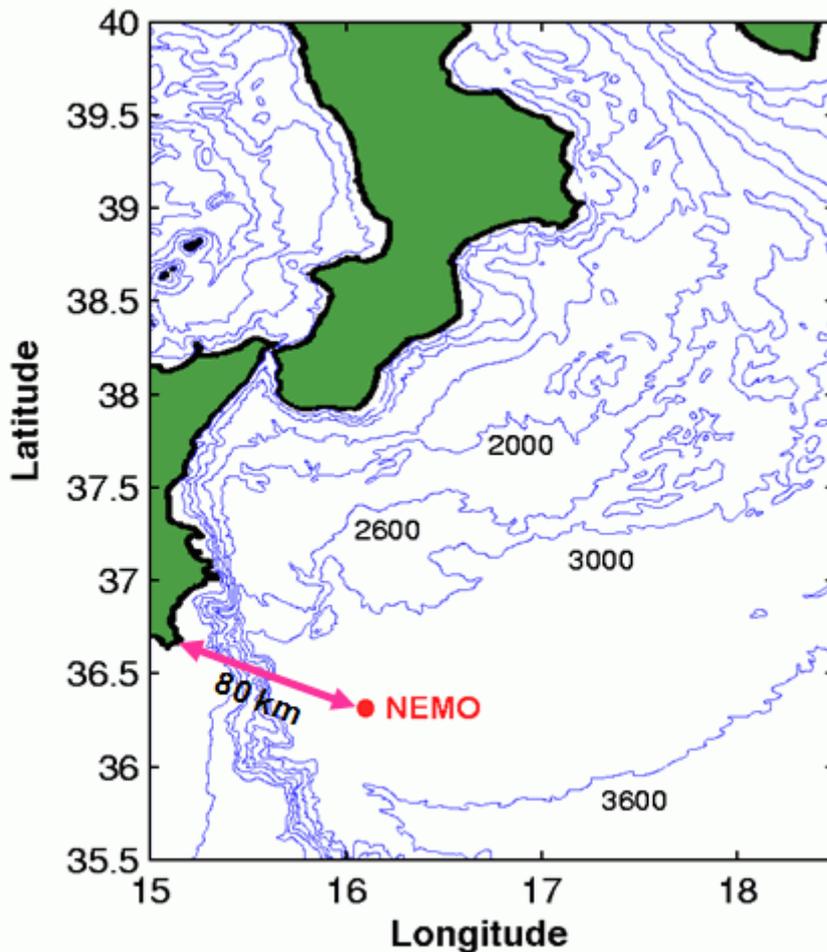
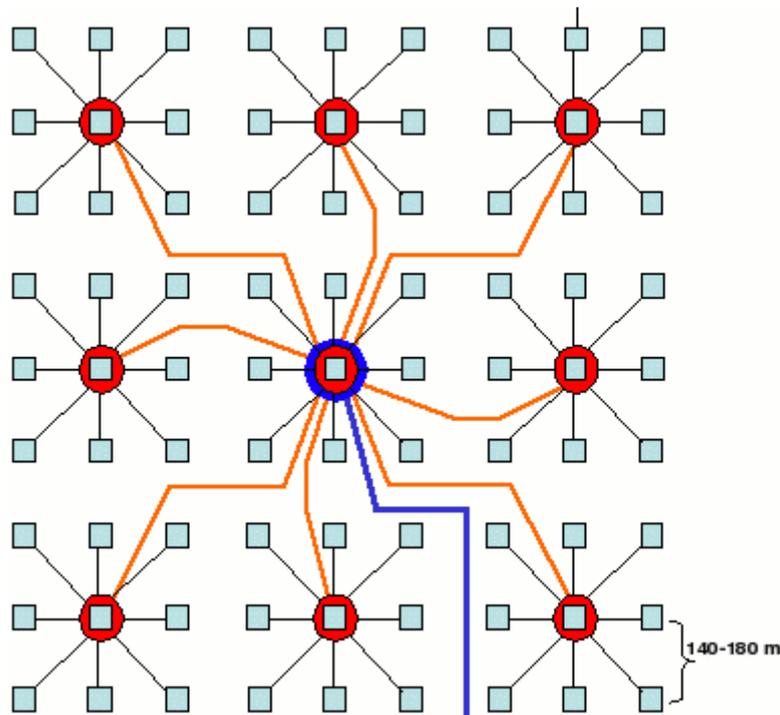


Рис. 12. Географическое положение детектора NEMO.

Для детектора важно, что сезонные колебания этих параметров также минимальны. Кроме того, это довольно обширное плато с небольшими изменениями глубины, поэтому не возникнет проблем, если в дальнейшем будет производиться расширение. Планируемый объем детектора  $0,88 \text{ км}^3$ . На рисунке 13 приведена планируемая конфигурация детектора NEMO.



*Рис. 13. Конфигурация детектора NEMO.*

На схеме квадратами обозначены башни, красные и синие линии – электрооптические кабели для передачи информации, красные кружки – соединительные коробки. Как видно из схемы, планируется опустить под воду 81 башню, на которых в общей сложности будет 5832 оптических модуля.

Башни – гибкая конструкция, состоящая из 16 консолей, соединенных между собой тросами (рис. 14). Снизу они крепятся к дну, а сверху растягиваются бум. Высота каждой около 750 м, причем расстояние между самым верхним и нижним ФЭУ порядка 600 м. Расстояние от нижней консоли до дна – 150м.

На каждой консоли крепится 4 ФЭУ по 2 с каждой стороны, причем один направлен вверх, а другой вниз.

До погружения конструкция довольно компактна – консоли прижаты друг к другу. После погружения буй начинает всплывать, тем самым натягивает тросы (рис. 15).

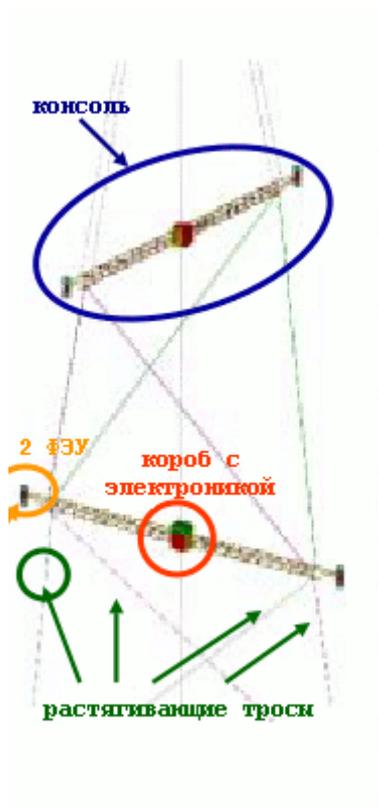


Рис. 14. Часть башни.

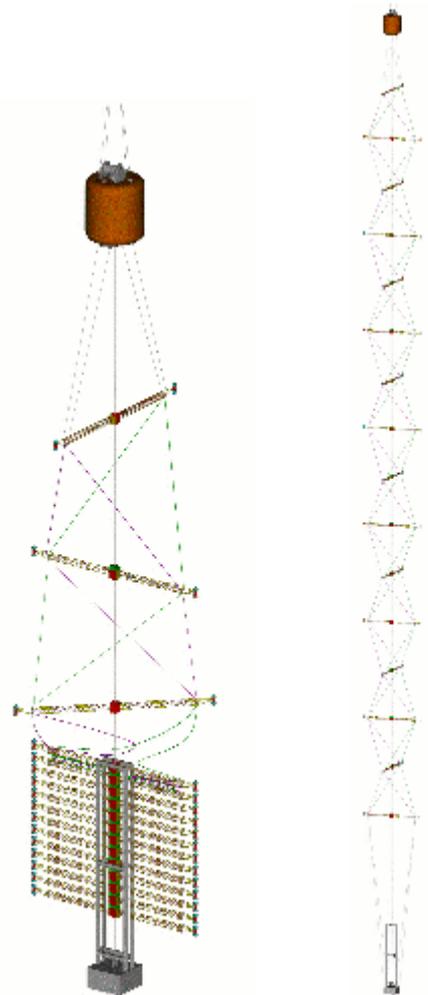


Рис. 15. Развертывание башни в воде и готовая к работе башня.

## **5. Эксперименты по исследованию акустического поля**

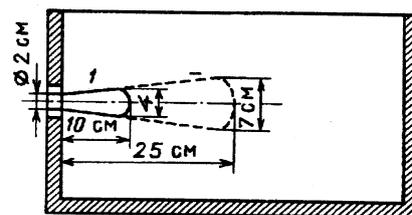
В настоящее время акустический метод регистрации нейтрино является перспективным и востребованным. Он превосходит черенковский метод по ряду параметров. Однако, акустический метод сложен в практической реализации в силу недостаточной изученности механизмов формирования и распространения акустических волн от заряженных частиц. Для выяснения этих механизмов с конца 70-х и по настоящее время проводятся различные эксперименты на ускорителях. Последним таким экспериментом, внесшим значительный вклад в понимание этих механизмов является эксперимент, проведенный в НИИЯФ. В данном разделе приведен обзор проводившихся экспериментов на ускорителях, а также подробно описан эксперимент, проведенный в НИИЯФ.

### **5.1. Эксперимент BNL**

Первый эксперимент по проверке гипотезы о терморadiационном механизме генерации звука был проведен в Brookhaven National Laboratory и Harvard University в 1978 году [11]. Изучался акустический сигнал, возникающий в жидкостях от пучка протонов с энергией 158 МэВ, 200 МэВ и 28 ГэВ. На линейном ускорителе в BNL (200 МэВ) размеры бассейна позволяли проводить измерения в дальней зоне (гидрофон располагался на расстоянии 1 м от оси пучка). При других энергиях размеры бассейна были меньше, но все же существенно превышали характерную длину волны звука в воде. Энерговыведение в импульсе варьировалось от  $10^{15}$  до  $10^{21}$  эВ. Целью экспериментов было главным образом подтверждение терморadiационного механизма генерации звука и исследование зависимости акустического сигнала от параметров пучка (энергии, интенсивности, длительности импульса и др.). В результате эксперимента был получен ряд других зависимостей, свидетельствующих в пользу терморadiационного механизма генерации звука пучком протонов в воде.

## 5.2. Эксперимент на ускорителе электронов в ИЯИ

В середине 80-х годов в ИЯИ АН СССР был реализован эксперимент по измерению акустического сигнала от пучка электронов в воде [12].



Энергия электронов составляла 20 и 50 МэВ, длительность импульса 1,4 мкс, средний ток в импульсе составлял от 0 до 10 мкА. Диаметр пучка на входе бассейна был равен 2 см. Размеры бассейна составляли 60х60х60 см. Гидрофон имел среднюю чувствительность 10 мкВ/Па в полосе до 200 кГц. В этой же полосе усилитель обеспечивал усиление около  $2 \cdot 10^3$ . Поскольку собственные шумы усилителя по входу составляли 13 мкВ, то чувствительность установки составляла 1,3 Па по отношению сигнал/шум, равному 1.

По измерению времени задержки от начала развертки на экране осциллографа до начала акустического сигнала при различных местоположениях гидрофона в ванне была определена форма области поглощения энергии (то есть форма образующейся в воде термоакустической антенны). Она представляет собой расходящийся усеченный конус с углом раствора порядка  $10^\circ$  (рис. 16).

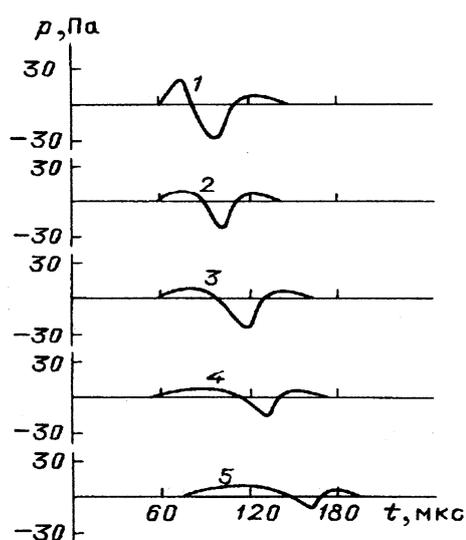


Рис. 17. Форма и амплитуда акустического сигнала при расположении гидрофона на расстоянии 10,5 см от оси пучка и различных расстояниях от точки входа пучка: 3; 8; 10,5; 13 и 18 см (кривые 1-5 соответственно).

В результате эксперимента тепловой механизм генерации звука был подтвержден как пропорциональностью амплитуды сигнала суммарной энергии, заключенной в импульсе, так и значительным уменьшением акустического сигнала при понижении температуры воды до 4 градусов (когда коэффициент теплового расширения обращается в нуль). Формы и амплитуды акустических сигналов на расстоянии 10,5 см от оси пучка и

на различных расстояниях от места ввода пучка приведении на рисунке 17. Если расположить гидрофон вблизи начала термоакустической антенны, то такая ситуация хорошо соответствует приближению ближнего звукового поля от цилиндра. Сигнал имеет форму, близкую к той, которая предсказывается теорией.

### **5.3. Эксперимент на пучке протонов в ИТЭФ**

В 2000-2004 годах на ускорителе в ИТЭФ проводились эксперименты по измерению акустического сигнала от пучка протонов в воде [13-16]. Их целью являлось получение пространственно-временной структуры акустического поля, а также наблюдение зависимости акустического сигнала от параметров пучка. В рамках проверки гипотезы о терморadiационном механизме генерации звука была также измерена зависимость сигнала от температуры воды.

Энергии протонов составляла 200 МэВ. В качестве мишени служила вода 3% солености, заполняющая бассейн в форме параллелепипеда размерами 50,8 x 52,3 x 94,5 см. Параметры пучка были следующими: длительность импульса ускорителя - 70 нс, пространственная форма пучка в поперечном направлении имела форму, близкую к гауссовой, диаметр пучка (ширина на полувысоте) – 2 см. Интенсивность пучка составляла около  $4 \cdot 10^{10}$  протонов в импульсе. Измерения проводились с помощью гидрофонов, обладающих линейной АЧХ в области частот 0,1 – 100 кГц. Уровень сигнала в условиях эксперимента превышал уровень собственных шумов гидрофонов на 12-15 Дб.

В данных экспериментах получена структура акустического поля, в ней выделены вклады от трех частей термоакустической антенны (от протяженной средней части, от области максимальной плотности энерговыделения в конце пробега протонов – пика Брэгга, и от заглушки в области входа пучка в воду). Также было подтверждено изменение полярности сигнала при температуре воды около 4°C, что указывает на терморadiационный механизм генерации звука. Поскольку сигнал меняет также и форму, при таких температурах возможен существенный вклад других механизмов, например, микрострикционного.

#### 5.4. Эксперимент НИИЯФ

В апреле 2006 года был проведен эксперимент на импульсном разрезном микротроне RTM70 НИИЯФ МГУ [17]. Энергия электронов в эксперименте составляла 50 МэВ, длительность импульса ускорителя – 8 мкс, частота повторения импульсов – 10 Гц. Пространственная форма сечения пучка - квазиэллиптическая (размер в вертикальной плоскости около 5 мм, в горизонтальной - около 2,5 мм). Ток пучка контролировался с помощью трансформаторного датчика и в среднем составлял 2 мА. Это соответствует средней интенсивности около  $10^{11}$  частиц в импульсе. Суммарное энерговыделение в импульсе составляло порядка  $5 \cdot 10^{18}$  эВ.

В качестве среды, в которой возникало исследуемое ультразвуковое поле, использовалась дистиллированная вода, заполнявшая бассейн из оргстекла, который применялся ранее в акустических экспериментах на ускорителе протонов [15,16]. Бассейн имел форму параллелепипеда размерами 50,8 x 52,3 x 94,5 см. На рисунке 18 представлен эскиз бассейна с необходимыми для анализа данных размерами. Уровень воды в эксперименте составлял 390 мм, ее средняя температура была равна 20,5°C. При этом возможное локальное увеличение температуры в результате прохождения пучка не контролировалось. Размеры бассейна были достаточными, чтобы при анализе данных разделить прямой сигнал от пучка и сигналы, отраженные от стенок. Пучок электронов вводился в центр измерительного объема через дюралюминиевую трубу диаметром 59 мм, длиной 460 мм и толщиной стенки 1,5 мм, вмонтированную в стенку бассейна и закрытую заглушкой из тефлона толщиной 2 мм.

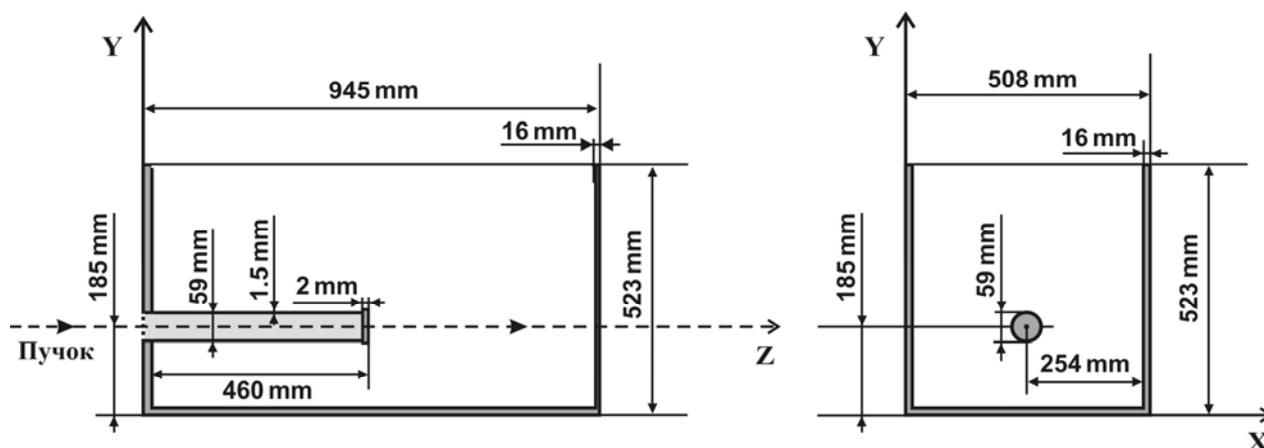


Рис. 18. Эскиз измерительного бассейна.

Измерения проводились с помощью широкополосного (до 160 кГц) высокочувствительного ( $> 1$  мВ/Па) измерительного гидрофона, изготовленного специалистами ВНИИФТРИ для проведения измерений по радиационной акустике. В качестве преобразователя в гидрофоне используется пьезоэлектрическая керамика с тангенциальной поляризацией.

Блок-схема эксперимента представлена на рис. 19. Гидрофон подключался через собственный предусилитель, а также через измерительный усилитель Robotron (усиление 50 Дб, полоса частот 20 Гц - 200 кГц) и усилитель У7-1 (усиление 10 Дб, полоса частот 10-100 кГц).

Считывание информации производилось с помощью 2-лучевого осциллоскопа ТЕКТРОНИХ TDS 3032, управляемого с помощью персонального компьютера. Время наблюдения сигнала составляло 1 мс, каждое измерение содержало  $10^4$  точек по 0.1 мкс. Запуск осциллоскопа производился синхрои импульсом от генератора, управляющего работой ускорителя, и предшествовал по времени приходу пучка на мишень приблизительно на 4 мкс. На один из двух каналов осциллоскопа выводился сигнал с трансформаторного датчика, на другой канал – усиленный сигнал с гидрофона. Осциллограммы записывались на диск компьютера в собственном формате осциллоскопа.

Осциллограммы акустических сигналов были зарегистрированы в 100 точках на прямолинейной трассе, коллинеарной оси пучка электронов и расположенной в горизонтальной плоскости, проходящей через ось пучка. Расстояние между трассой и осью пучка составляло  $X_0 = 6,5$  см. Гидрофон перемещался вдоль трассы с помощью электромеханического сканера с

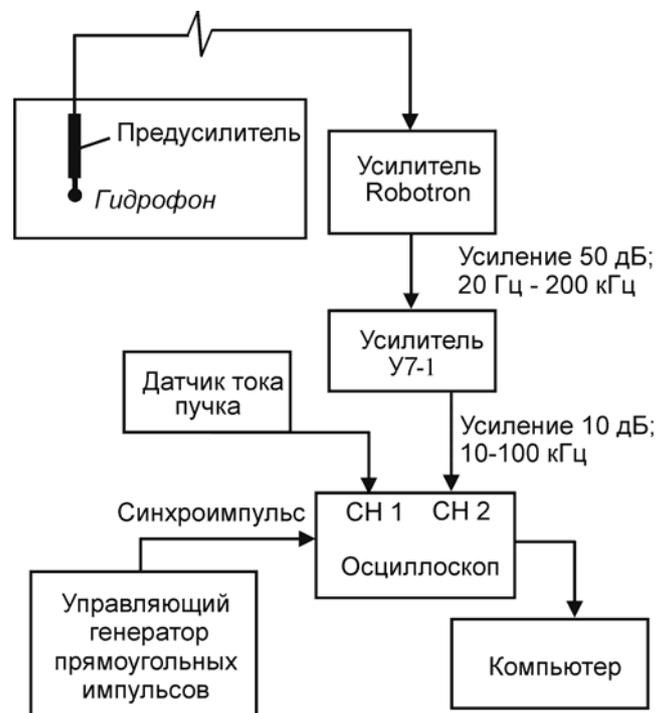
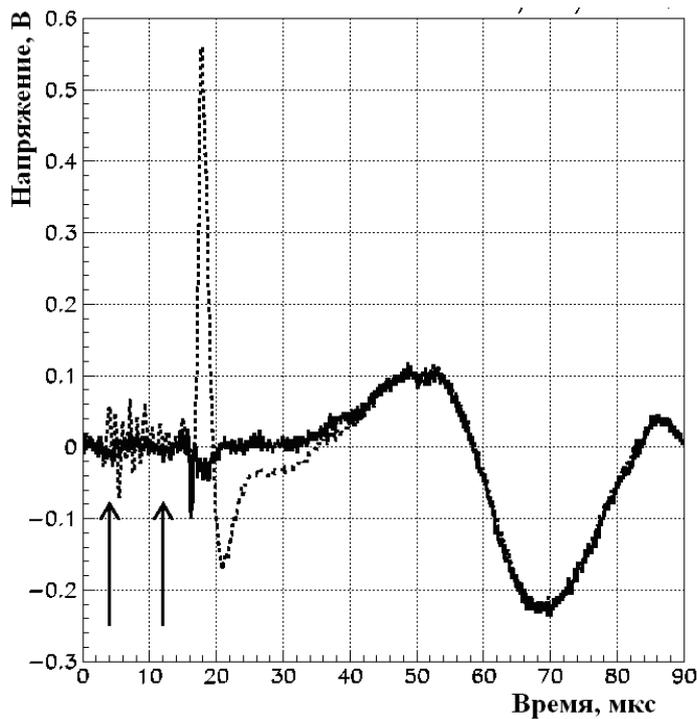


Рис. 19 Блок-схема эксперимента.

дистанционным управлением оригинальной конструкции В.И. Албула [14]. Шаг сканера составлял 4,45 мм. Координата  $Z$  начальной точки измерения совпадала с началом акустической антенны.

### **5.5. Результаты эксперимента НИИЯФ**

На рисунке 20 пунктирной линией показан фрагмент сигнала с гидрофона, зарегистрированного на расстоянии 8 см от начала сканирования. По оси абсцисс отложено время от момента прихода синхроимпульса в мкс, по оси ординат – величина напряжения в вольтах. Интервал времени действия электронного пучка (4-12 мкс) отмечен стрелками. Акустический сигнал, возбуждаемый пучком, расположен в интервале от 34 до 85 мкс и имеет биполярную форму. При  $t=18$  мкс наблюдается электромагнитная наводка, связанная с работой ускорителя, по амплитуде превышающая полезный сигнал в несколько раз и затрудняющая анализ при малых временах ( $< 36$  мкс) и, следовательно, при малых расстояниях между источником и приемником звука. Существенно уменьшить влияние наводки можно, вычитая ее из зарегистрированного сигнала. Наводка была измерена при работе ускорителя в отсутствии электронного пучка, ее характер определяет форму зарегистрированного сигнала в интервале 18-36 мкс. Результат вычитания показан на рисунке сплошной линией. Из рисунка следует, что процедура вычитания наводки позволяет, по крайней мере, в 7 раз подавить влияние паразитных сигналов при  $t < 25$  мкс и отодвинуть нижнюю границу исследуемой области до 2-5 мкс от начала сигнала, что важно для уточнения механизма возникновения радиационно-акустических волн. Результаты, представленные ниже, получены с применением данной процедуры.



*Рис. 20. Сигнал с гидрофона, зарегистрированный на расстоянии  $Z = 8$  см от начала акустической антенны и  $X_0 = 6,5$  см от ее оси. Пунктиром показан исходный сигнал, сплошной линией – сигнал после вычитания наводки. Стрелками отмечено время воздействия пучка электронов.*

На рисунке 21 изображены друг под другом временные зависимости ультразвуковых сигналов, зарегистрированные в 66 точках на трассе измерения. Сигналы нормированы на 1 мА тока пучка. По оси ординат указаны расстояния вдоль трассы в сантиметрах, по которым можно вычислить координаты точек в пространстве бассейна.

Акустические сигналы образуют в плоскости (t-Z) три траектории, две из которых (AB и DE) имеют в качестве источника область распространения пучка электронов, третья (abe) является отражением сигналов исследуемого источника от дна бассейна. Траектории AB в виде гребней переменной амплитуды соответствует первая полуволна акустического сигнала (полуволна сжатия) от ближайшей точки излучающей цилиндрической антенны. Траектория почти параллельна оси расстояний, т.к. время распространения данного сигнала от источника до приемника одинаково с точностью до изменения поперечных размеров электронно-фотонного ливня.

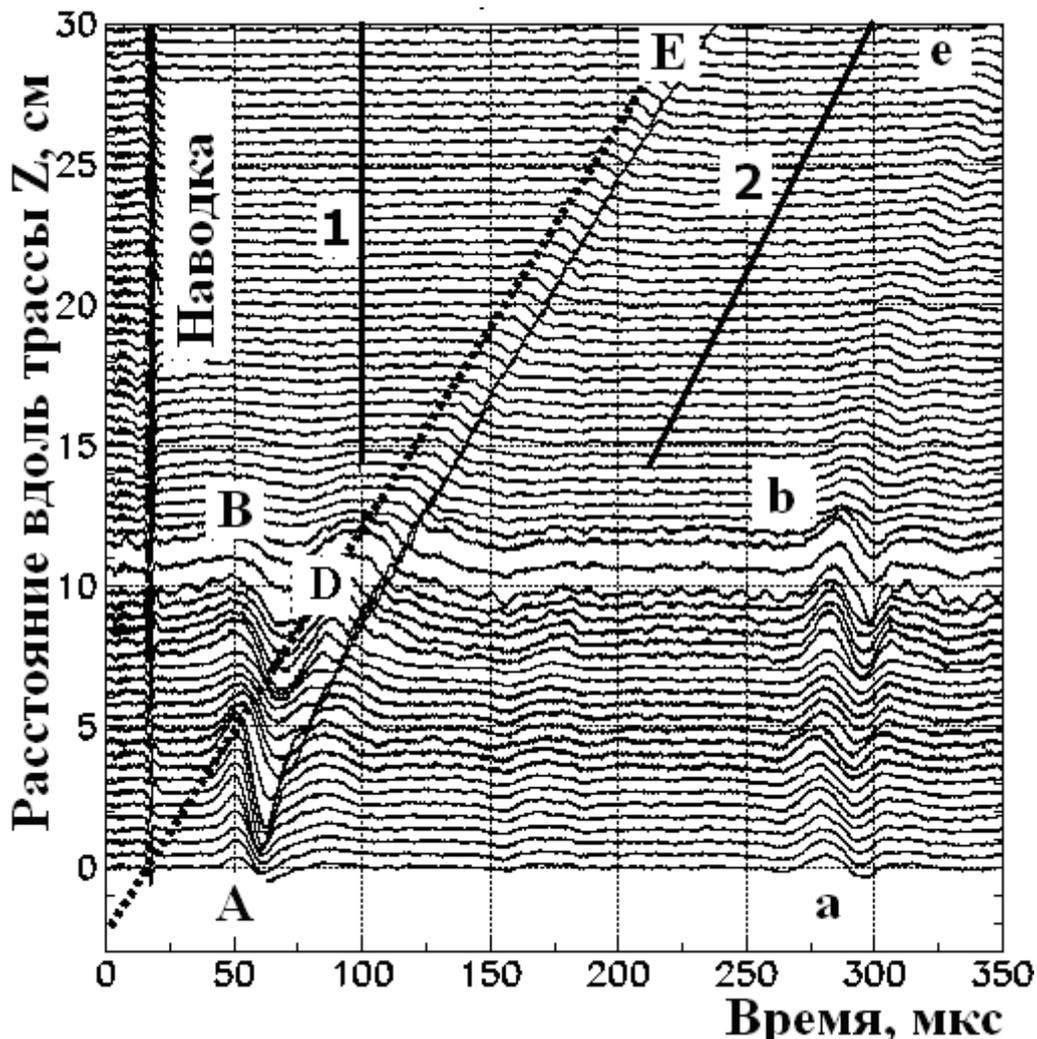


Рис. 21. Пространственно-временная структура акустического поля, создаваемого пучком электронов в воде.

Сигналы, образующие траекторию DE, начинаются с полуволны разрежения. Судя по времени появления сигналов, по форме (прямая линия) и направлению траектории, их источник находится в окрестности заглушки, отделяющей водную среду от воздуха. Ранее подобные сигналы были зарегистрированы в экспериментах с электронным [12] и протонным [15,16] пучками. Пунктирная линия на рисунке – результат аппроксимации точек, соответствующих началу акустических сигналов, линейной зависимостью  $R_i = V t_i + r$ , где  $i$  – номер точки трассы с координатой  $Z_i$ , в которой зарегистрирован данный сигнал (начало отсчета координаты  $Z$  совпадает с началом трассы сканирования),  $t_i$  – время прихода сигнала к гидрофону,  $R_i = \sqrt{X_0^2 + Z_i^2}$  – расстояние от центра заглушки до гидрофона. Аппроксимация

выполнена на отрезке трассы от 13 до 37,5 см. Численные значения скорости звука  $V$  и расстояния  $r$  до источника звука в начальной точке сканирования находились в результате аппроксимации.

Для установления момента  $t_i$  прихода сигнала применялся следующий алгоритм. В каждой  $i$ -ой точке находился минимум акустического сигнала. Область поиска минимума ограничивалась в нулевом приближении интервалами времени, где анализируемый сигнал был единственным. Нижняя и верхняя границы этой области отмечены на рисунке 21 прямыми 1 и 2, соответственно. На рисунке 22 представлен фрагмент сигнала, полученного при  $Z = 15,6$  см, найденный минимум указан стрелкой, помеченной как  $t_{\min}$ . Далее методом наименьших квадратов в интервале  $(t_{\min} - 120 \text{ мкс} < t < t_{\min} + 5 \text{ мкс})$  находились параметры аппроксимирующего гауссиана. Его среднее значение  $t_G$  и стандартное отклонение  $\sigma$  служили для вычисления момента  $t_0$  прихода сигнала к гидрофону,  $t_0 = t_G - 2\sigma$ . Этот момент показан на рисунке стрелкой, направленной вверх. Таким образом, для каждой из 57 точек на отрезке были известны времена  $t_{0i}$  и расстояния  $R_i$ . Эти пары чисел нанесены на график рисунке 23. Прямая линия – результат аппроксимации точек линейной зависимостью. Найденное значение скорости звука на данной траектории оказалось равным  $V = (1435 \pm 12) \text{ м/сек}$ . Это значение можно сравнить с величиной скорости звука, измеренной в калибровочном опыте, проведенном в том же бассейне с пьезоэлектрическим излучателем в качестве источника звука, и равной  $(1461 \pm 15) \text{ м/сек}$ . Значения совпадают в пределах двух стандартных

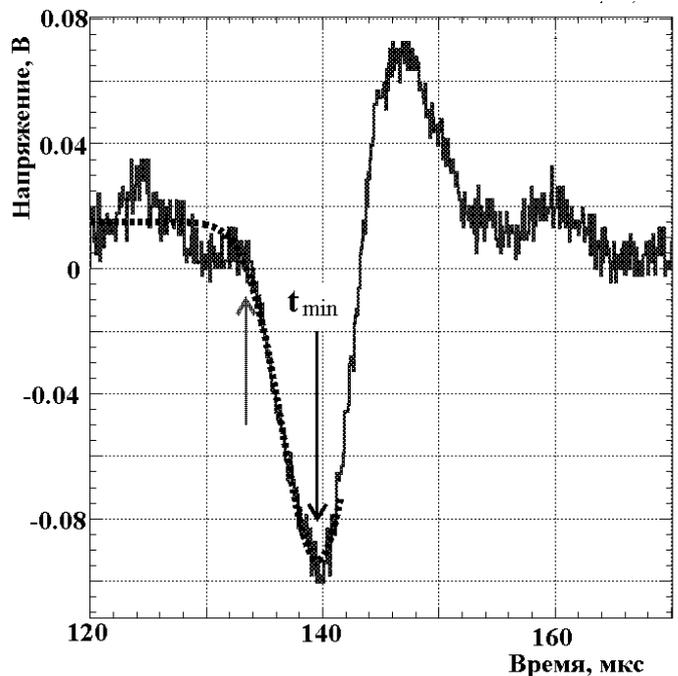
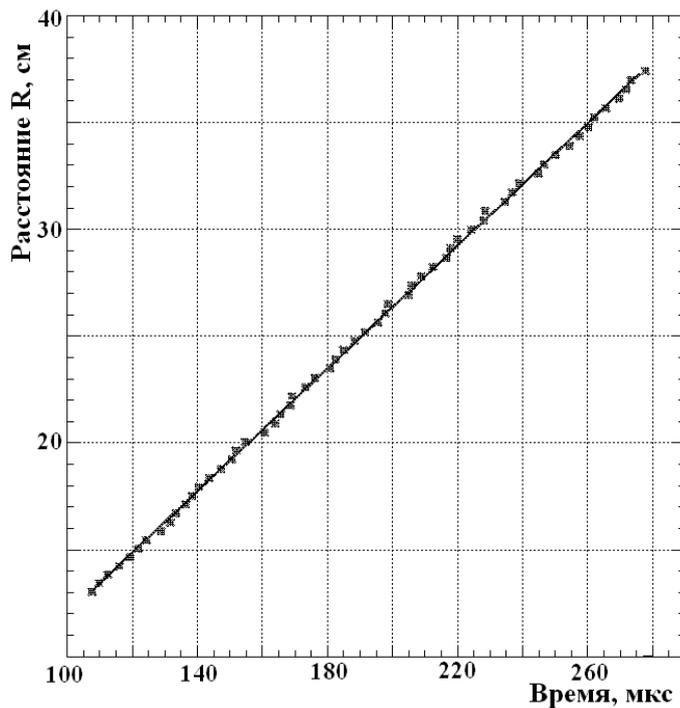


Рис. 22. Иллюстрация к алгоритму установления времени прихода сигнала. Пунктирной линией показана аппроксимация гауссианом сигнала, зарегистрированного на траектории E на расстоянии 15,6 см от начала электронно-фотонного ливня.

отклонений, небольшие различия могут иметь место из-за конечных размеров излучателя и приемника.

Что касается вычисленного значения коэффициента  $r = (-2,50 \pm 0,05)$  см, то его статистически значимое отклонение от  $X_0$  при  $t = 0$ , возможно, свидетельствует о неодинаковой скорости звука в невозмущенной среде (далеко от источника) и в среде, где накладываются сигналы от двух источников звука. Одной из причин увеличения скорости звука вблизи электронного пучка могло быть локальное увеличение температуры, вызванное действием пучка. Качественно изменение скорости звука на малых расстояниях от центра пучка можно наблюдать на рисунке 21, где при  $t > 90$  мкс сигналы следуют аппроксимирующей прямой, а при меньших  $t$  отклоняются от нее.



*Рис. 23. Зависимость от времени расстояния между приемником излучения и центром заглушки, отделяющей водную среду от воздуха. Прямая линия – результат аппроксимации точек.*

## 6. Заключение

Создание эффективного детектора нейтрино высоких энергий – важная задача, необходимая для развития нейтринной астрофизики и совершенствования наших представлений об устройстве Вселенной. Развитие акустического метода детектирования нейтрино представляется перспективным и важным. Для этого необходимо знать особенности генерации и распространения акустических волн в воде под действием частиц высоких энергий. Эксперименты проводимые с конца 70-х годов позволили подтвердить ряд гипотез, однако множество явлений, важных для успешного акустического детектирования нейтрино, осталось недостаточно хорошо изучено. В последнем эксперименте НИИЯФ достигнуты следующие значительные результаты:

- впервые получена детальная пространственно-временная картина акустического поля, создаваемого в воде интенсивным пучком электронов, на прямой, параллельной оси пучка;
- использованный алгоритм обработки сигналов и способ представления результатов позволили надежно разделить сигналы от самой цилиндрической антенны и сигналы из области заглушки, через которую пучок электронов входит в воду;
- в результате анализа скорости распространения последних получено указание на возможное увеличение скорости звука в области наложения двух указанных сигналов.

Причину последнего эффекта предполагается установить в дальнейших экспериментах.

## Список литературы

1. Gaisser T.K., Halzen F. and Stanev T. Particle astrophysics with high energy neutrinos // Phys. Reports, 1995, Vol. 258, 173-236
2. Nikolai G. Lehtinen et al. :astro-ph/0104033
3. Gunter Sigl :astro-ph/0104291
4. Glaser D.A., Rahm D.C. Characteristics of Bubble Chambers // Phys. Rev., 1955, Vol. 97, 474-479.
5. Аскарьян Г.А. Гидродинамическое излучение ионизирующих частиц в стабильных жидкостях // Атомная энергия, 1957, Т. 3, 152-153.
6. White R.M. Generation of Elastic Wave by Transient Surface Heating // J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34, 3559-3567
7. Аскарьян Г.А., Долгошеин Б.А. // Письма в ЖЭТФ, 1977, Т. 25, 232.
8. R.U. Abbasi et al. :astro-ph/0208301
9. J. Vandembroucke et al. :astro-ph/0406105
10. Clay K Kirkendall, Dandridge A. // J. Phys. D, 2004, Vol. 37, R197-R216
11. Sulak L., Armsrong T., Baranger H. et al. // Nuclear Instruments and Methods, 1979, V.161, №2, 203-217.
12. Балицкий В.А., Городецкий В.С., Лямшев Л.М. и др. // Акустический журнал, 1985, Т. 31, № 5, 47.
13. Албул В.И., Бычков В.Б. и др.// Приборы и техника эксперимента, 2001, №3, 50.
14. Албул В.И., Бычков В.Б., Васильев С.С. и др. // ПТЭ, 2004, №4, 94.
15. Албул В.И., Бычков В.Б., Васильев С.С. и др. // ПТЭ, 2004, №4, 89.
16. Албул В.И., Бычков В.Б., Васильев С.С. и др. // Акустический журнал, 2005, Т. 51, №1, 47.
17. Бычков В.Б., Демидов В.С. и др. // Вестник МГУ, серия «Физика и астрономия», 2007, №3 ([ru.arxiv.org/pdf/physics/0610241](http://ru.arxiv.org/pdf/physics/0610241)).