

Разработка, конструирование и тестирование оптоволоконного гидрофона

Введение

На данный момент существует несколько методов детектирования нейтрино высоких энергий. Все они основаны на различных процессах, происходящих при взаимодействии нейтрино с веществом детектора (рис. 1).

Один из методов 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

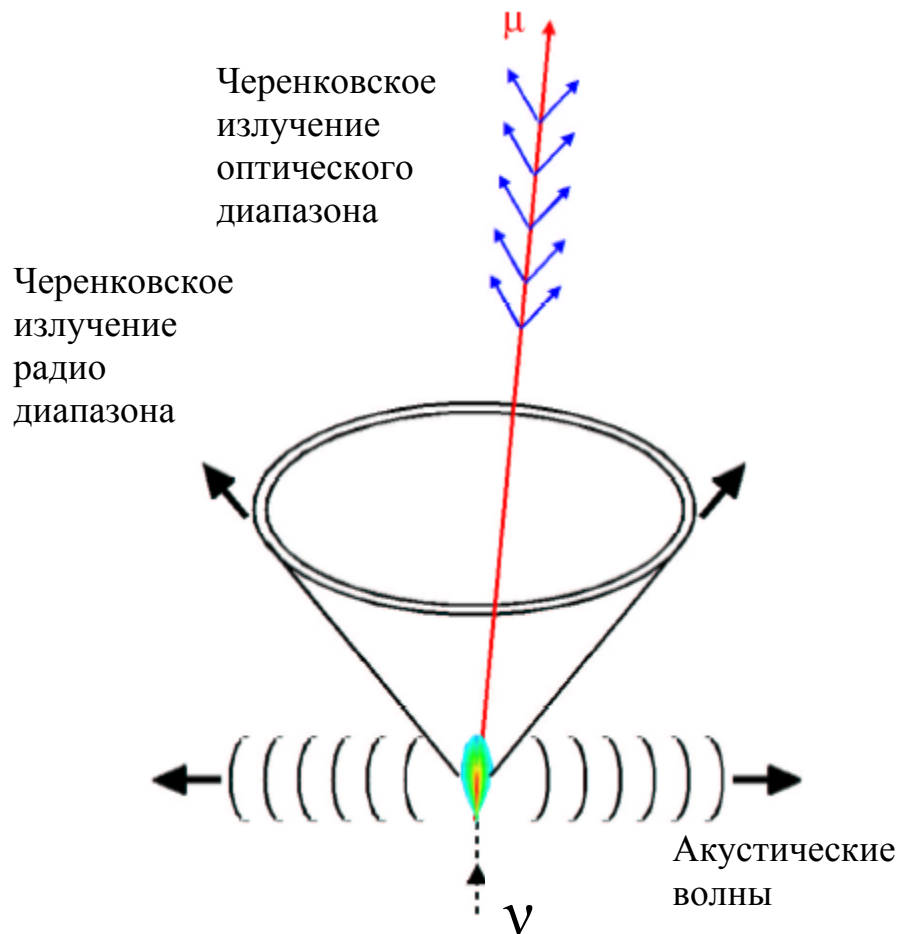


Рис. 1. Схематическое изображение происходящих в веществе процессов при взаимодействии нейтрино с атомом вещества.

испускать излучение Черенкова-Вавилова в оптическом диапазоне. Направление излучения определяется коэффициентом преломления вещества, в котором движется заряженная частица (в данной работе в качестве вещества рассмотрена морская вода), и образует конусообразный фронт. Черенковское излучение можно зафиксировать фотоэлектронными умножителями и, учитывая геометрию распространения излучения, восстановить трек частицы [1].

Еще один метод основан на регистрации радиоволн, испущенных электромагнитным ливнем. Если рожденный нейтрино лептон является электроном, то он рождает электромагнитный ливень. В 1962 г. 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 [2].

Наконец, метод, рассмотренный в данной работе, заключается в регистрации звуковых волн, которые возникают в воде при распространении адронных ливней. Первые исследования непосредственно радиационно-акустических эффектов относятся к 50–60-м годам. В 1955 году, например, Д. Глэзер и Д. Рам 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. Аскарьян в 1957 году рассмотрел возбуждение ультразвуковых и гиперзвуковых волн заряженными частицами в плотных средах вследствие локальных перегревов и рождения микрополостей. В 1963 году Р. Уайт наблюдал генерацию звука пучком электронов в твердом теле. Многочисленные исследования возбуждения звука проникающим излучением были выполнены, главным образом, учеными СССР и США в 70-80-е годы.

Механизм возникновения акустических волн заключается в том, что в области развития адронного (или электромагнитного) ливня вещество подвергается нагреванию и расширяется, создавая ударную волну, которая может впоследствии быть зарегистрирована. 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).

Нейтрино высоких энергий в основном взаимодействует с веществом посредством неупругого рассеяния на адронах. Получивший энергию адрон

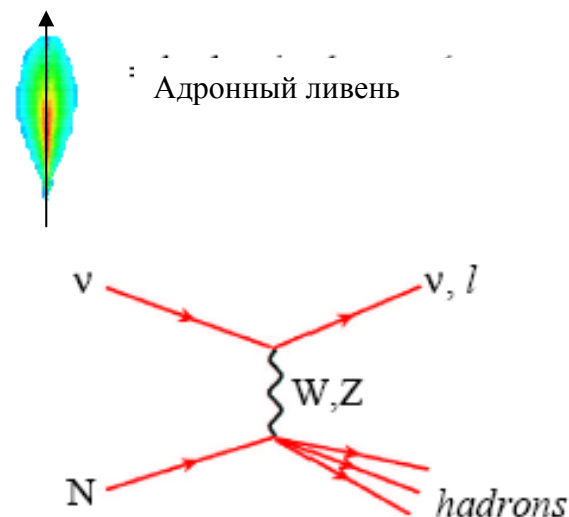


Рис 2. Схематическое изображение развития адронного ливня и диаграмма Фейнмана реакции взаимодействия нейтрино с ядром.

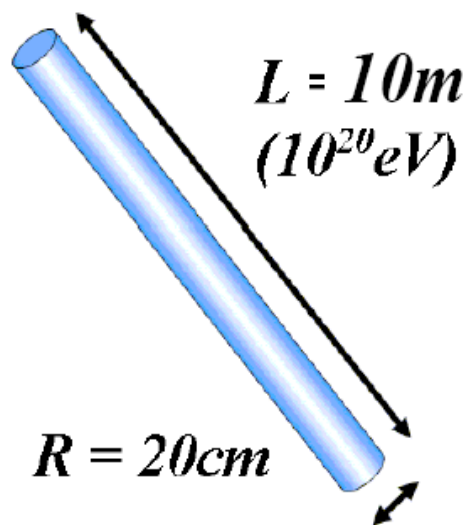


Рис 3. Размеры области, занимаемой адронным ливнем, инициированным нейтрино с энергией 10^{20} эВ в воде.

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.2). [3]

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. 3).

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. 3а). Высота такого цилиндра приблизительно равна длине ливня, а радиус определяется расстоянием распространения звуковых волн в веществе: ~ 10 км для воды (рис. 4). Это делает регистрацию и последующую обработку данных более простыми.

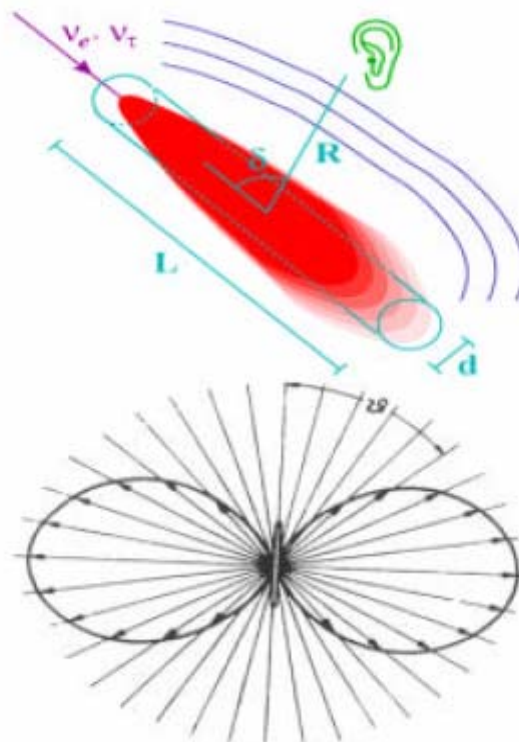


Рис. 3а. Схематическое изображение области распространения акустического сигнала, возникшего от расширения перегретого цилиндрического объема жидкости развивающимся в веществе адронным ливнем.

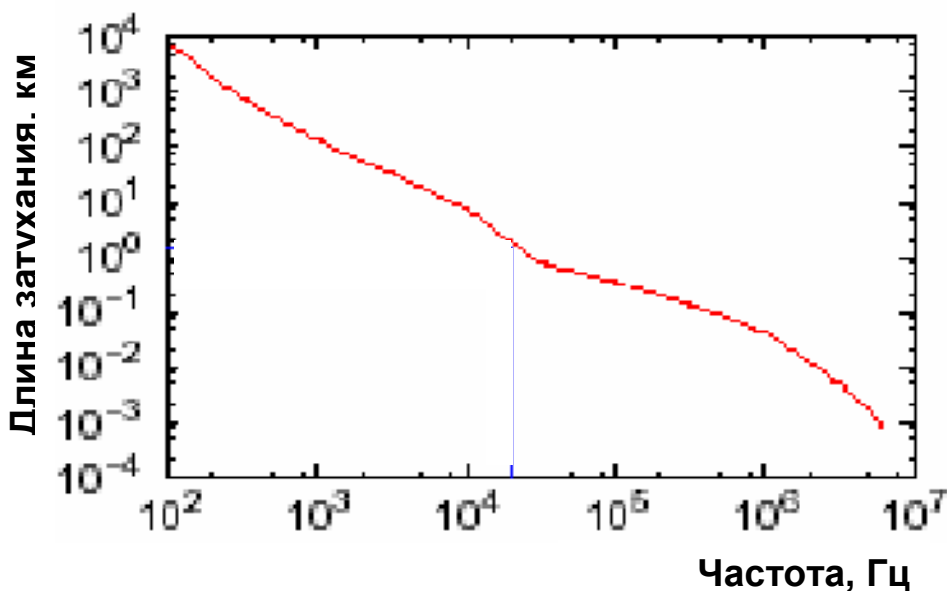


Рис. 4. Зависимость длины затухания звукового сигнала в воде от его частоты.

Таким образом, область распространения звука хорошо описывается фигурой цилиндрической формы на расстоянии 1 км. Расстояние, на которое распространяется звук в веществе, зависит от частоты акустического сигнала. На рисунке 5 показан спектр акустического сигнала от адронного ливня в зависимости от частоты.

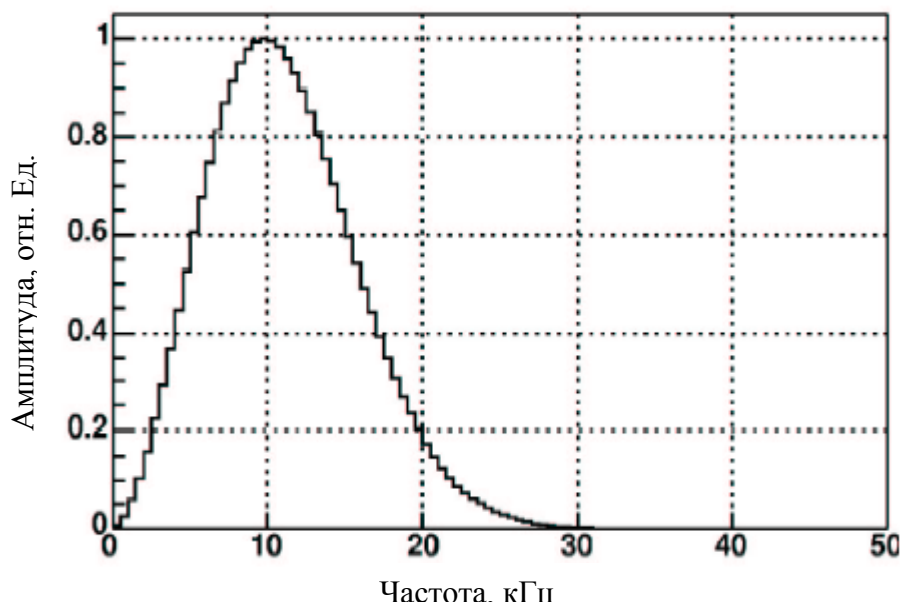


Рис 5. Зависимость относительной интенсивности сигнала от частоты.

Максимум интенсивности сигнала от ливня, образованного нейтрино с энергией 10^{20} эВ, приходится на частоту 10 кГц. Эти данные были рассчитаны или измерены в проекте SAUND [4].

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. Известно, что звуковой сигнал на расстоянии ~ 1 км распространяется по цилиндрической поверхности, радиус которой увеличивается со скоростью звука в воде. Эта информация используется в процессе реконструкции события [5].

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. К тому же для восстановления события необходимо

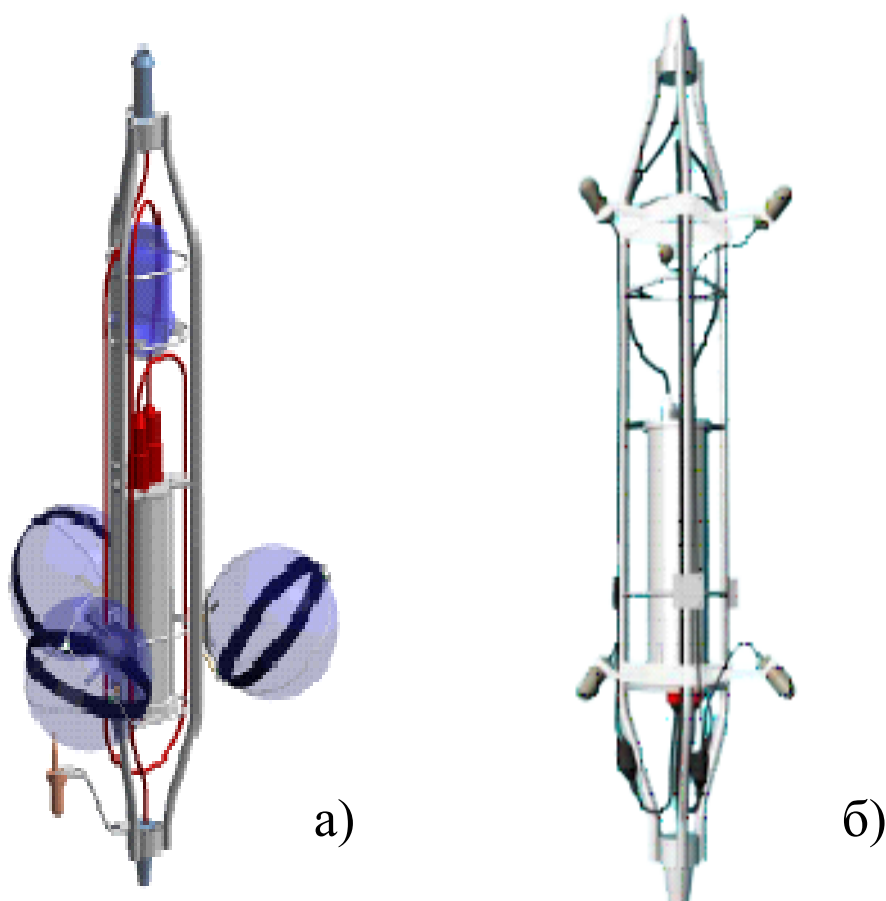


Рис 6. Изображение элементарных конструктивных единиц детектора (кластеров) с оптическими модулями а) и с гидрофонами б)

иметь количество точек (координат и времени регистрации сигнала) равное, как минимум, количеству степеней свободы адронного ливня.

На данном этапе разработки и освоения акустических методов регистрации нейтрино возможно использование проектируемых (ANTARES, NEMO, NESTOR) и уже существующих (AMANDA, NT-200) нейтринных телескопов, принцип действия которых основан на регистрации оптического черенковского излучения. Так как методы взаимно независимы, то нет препятствий для совмещения акустической и оптической аппаратуры в одной установке. На рисунке 6 изображены конструкции детектора ANTARES с оптическими модулями (рис. 6а) и с гидрофонами (рис. 6б).

Разработка и создание гидрофона

Для применения акустического метода регистрации нейтрино был разработан, создан и протестирован гидрофон на основе оптического волокна. Такой тип гидрофона позволяет регистрировать звуковые сигналы с частотой, близкой к 10 кГц, а также обладает простой конструкцией и не зависит от источников электрического питания.

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 τ , 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. 1).

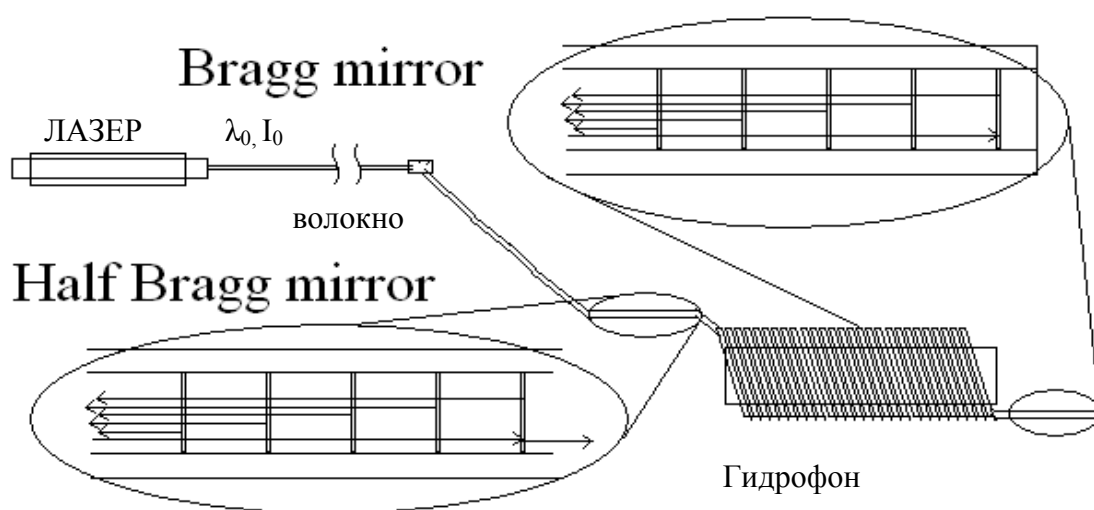


Рис. 1 Схематическое изображение линии оптического волокна в оптоволоконном гидрофоне с парой зеркал Брегга.

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

Разница фаз двух импульсов выражается следующим уравнением:

$$\frac{d\varphi}{\varphi} = \frac{dL}{L} + \frac{dn}{n} + \frac{dk}{k}, \quad (1)$$

где dL и dn отражают физические изменения в оптическом волокне, изменения длины и коэффициента преломления, а dk отвечает за изменения длины волны и фазы проходящего по оптическому волокну сигнала [6-7].

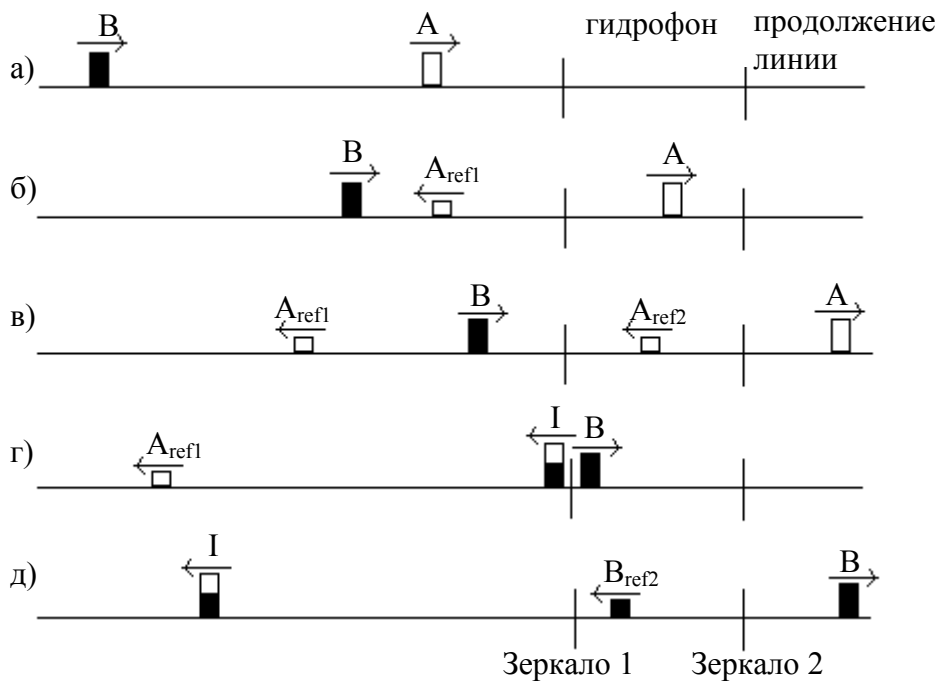


Рис. 2. Этапы прохождения двух световых импульсов по каналу оптоволокну с встроенным гидрофоном и зеркалами. А и В начальные импульсы, A_{ref1} , A_{ref2} , B_{ref1} – отраженные импульсы от первого и второго зеркала соответственно, I – результат интерференции импульсов A_{ref2} и B_{ref1} (на рисунке не указан).

В дальнейшем считаем, что параметры n и k не изменяются под действием звукового сигнала.

Звуковая волна в воде создает область повышенного давления ~ 60 мПа. Под действием давления деформируется упругий корпус гидрофона, и изменяется длина оптического волокна. Для используемого в данной работе оптического волокна фактор коррекции при эластическом сжатии-растяжении выражается формулой:

$$\xi = 1 - \frac{1}{2} n^2 P_{12} \approx 0.71, \quad (2)$$

где P_{12} коэффициент деформации, для кварца $P_{12} = 0.27$ (вещество, из которого изготовлен световод). Используя относительное изменение длины $\varepsilon = dL/L$, имеем:

$$\frac{d\varphi}{\varphi} = \xi \varepsilon, \quad (3)$$

или

$$d\varphi = \frac{2\pi n L \xi \varepsilon}{\lambda}, \quad (4)$$

откуда получаем, что сдвиг фаз прямо пропорционален длине оптического волокна. [8]

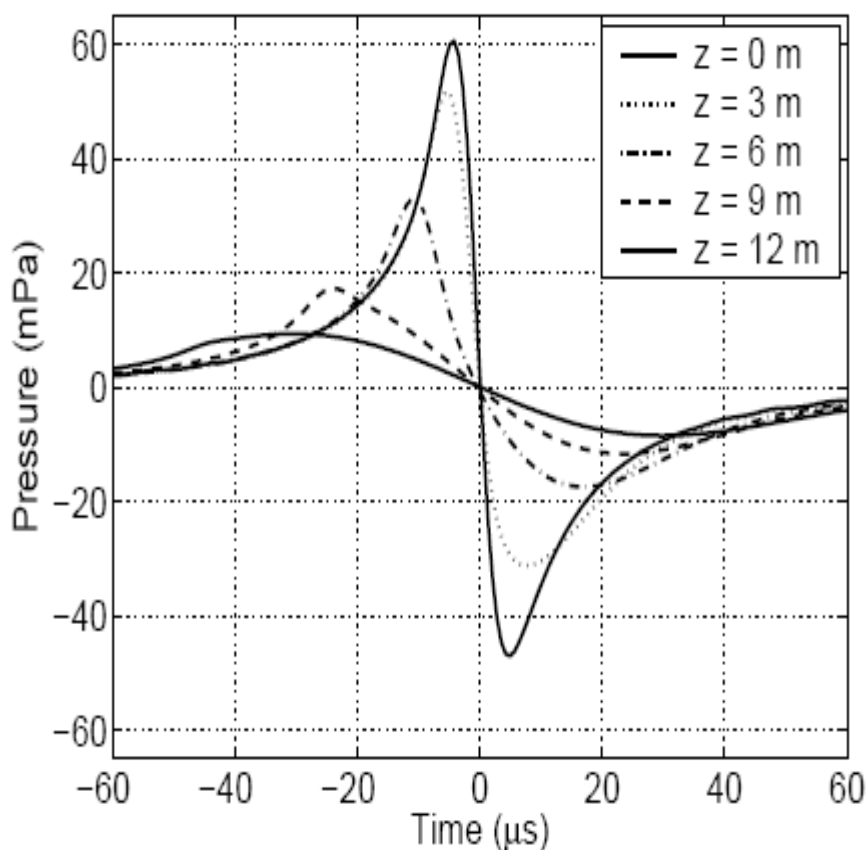


Рис. 3. Акустический сигнал, рассчитанный для точек на расстоянии 1000 км от адронного ливня в плоскости, перпендикулярной оси ливня. Энергия нейтрино 10^{20} эВ. Различные типы линий отвечают за расчеты, сделанные в точках на том же расстоянии от оси, но с разными значениями координаты z . Начало координат в геометрическом центре адронного ливня.

На рис. 3 показана форма сигнала, рассчитанного в рамках проекта SAUND [4]. Действие давления, создаваемого звуковым импульсом, на гидрофон длится ~ 10 мкс. Световой импульс затратит на прохождение линии оптоволокну с гидрофоном ~ 0.3 мкс. Соответственно, во время измерения величину давления, действующую на гидрофон, можно считать практически постоянной.

Зеркало Брегга

Для отражения и частичного отражения световых импульсов в устройстве гидрофона использованы зеркала Брегга - периодические структуры из чередующихся областей с разным коэффициентом преломления внутри световода оптоволокну. Периодическое изменение коэффициента преломления внутри оптического волокна образует подобие дифракционной решетки. Интервал между зонами такой решетки определяет длину волны отраженного света (рис. 4а). Длина волны в этом случае должна удовлетворять следующему условию:

$$\lambda = 2n\Lambda, \quad (5)$$

где n – любое целое число, Λ – период дифракционной решетки.

Такая структура может быть образована в оптическом волокне путем воздействия ультрафиолета. Существует два способа воздействия. Первый - интерференция двух когерентных ультрафиолетовых лучей в области создаваемой решетки (рис. 4б). Второй - использование одного луча и дифракционной решетки, подобной создаваемой (4в).

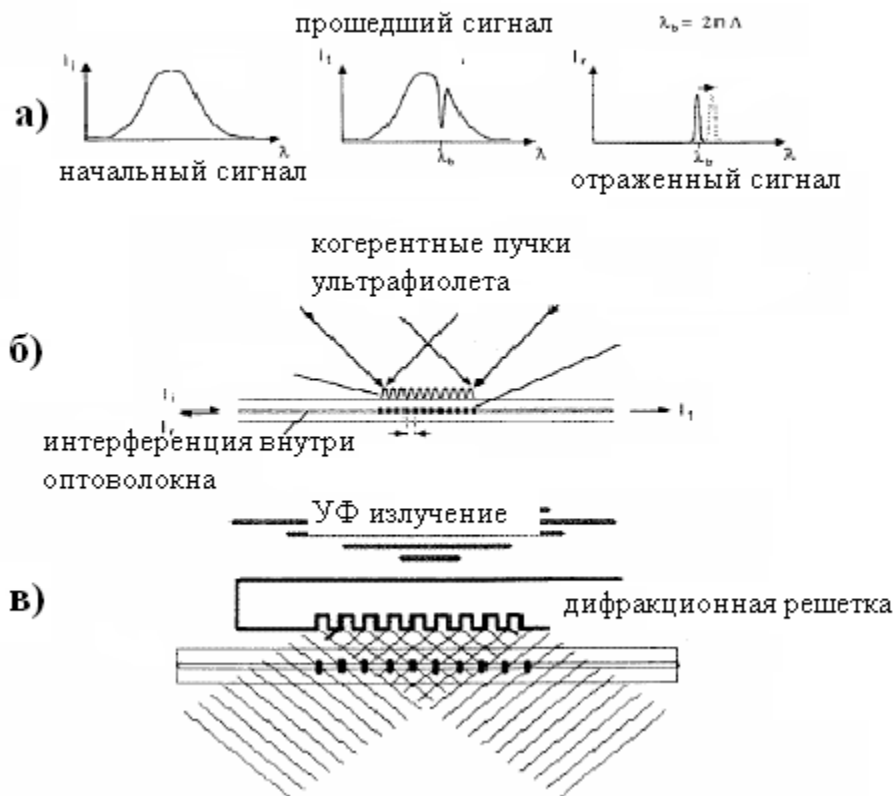


Рис. 4. а) спектр сигнала до и после прохождения зеркала Брегга; б) метод создания зеркала при помощи двух когерентных источников УФ излучения; в) метод создания зеркала с использованием одного пучка УФ излучения и дифракционной решетки.

В данном случае период решетки Брегга должен удовлетворять условию (5). В эксперименте используется лазер с длиной волны $\lambda = 1530$ нм и зеркало с периодом $\Lambda = 715$ нм. [9-11]

Создание прототипа гидрофона

Основа гидрофона собирается из нескольких частей и имеет форму катушки. Параметры основания гидрофона представлены на рис. 5. Оптическое волокно планируется наматывать на основную часть гидрофона. В идеальном случае количество слоев оптоволокна должно составлять 12 шт с одинаковым количеством витков в каждом. Диаметр основной части 15 мм - таким образом, длина одного витка составляет 41.7 мм. Среднее количество витков на одном слое ~ 150 . Таким образом, полная длина

оптоволоконна, необходимого для создания одного слоя, ~ 7 м, а для всего гидрофона – 85 м. Если учесть, что радиус витков каждого нового слоя увеличивается за счет наматывания его на предыдущий слой и что для соединения с линией и регистрирующей аппаратурой необходимо иметь два свободных конца длиной несколько метров, то суммарная длина оптического волокна, затраченного на изготовление одного гидрофона, составляет ~ 100 м.

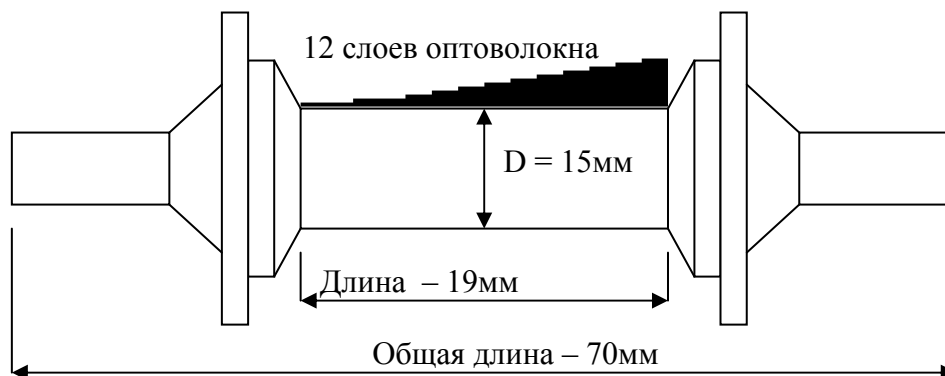


Рис 5. Схематическое изображение основы гидрофона.

При создании гидрофона использовалось оптическое волокно SMM-D1310A, параметры которого приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметр	SMB-D1310B	SMM-D1310A
Рабочая длина волны (нм)	1310	1310
Диаметр ядра (сердцевины, световода) (мкм)	6.0	6.0
Диаметр окружающей световод среды (мкм)	6.7 ± 1.0	6.7 ± 1.0
Диаметр первичного покрытия (мкм)	125 ± 2	80 ± 2
Диаметр защитного покрытия (мкм)	245 ± 15	135 ± 5
Потери света (Дб/км)	≤ 0.75	≤ 0.75
Минимальный радиус кривизны сгиба (мм)	≥ 10	≥ 7

Установка по производству гидрофона

Для производства гидрофона была собрана установка, состоящая из станка для наматывания волокна и контрольного оборудования. Станок включал в себя систему

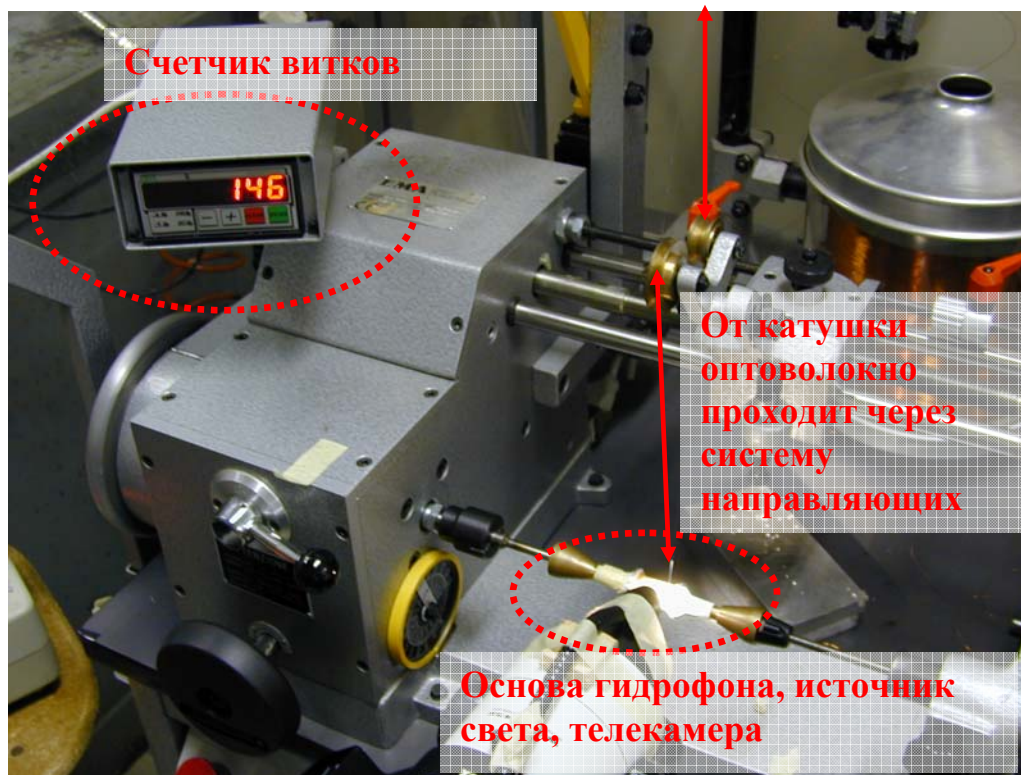


Рис. 6. Установка для производства гидрофона.

подачи оптоволокна, регулируемую по шагу витков систему намотки, работающую как в автоматическом, так и в ручном режимах, счетчик витков. Система контроля включала в себя микроскоп для наблюдения за процессом намотки, телекамеру, смонтированную с микроскопом, и монитор наблюдения (рис. 6 - 7).

Перед началом работ с оптическим волокном установка была опробована на медной проволоке малого диаметра. В качестве основы гидрофона был использован идентичный пластиковый прототип, установленный на станке. Апробация установки показала эффективную работу системы наблюдения, хорошее качество намотки в автоматическом

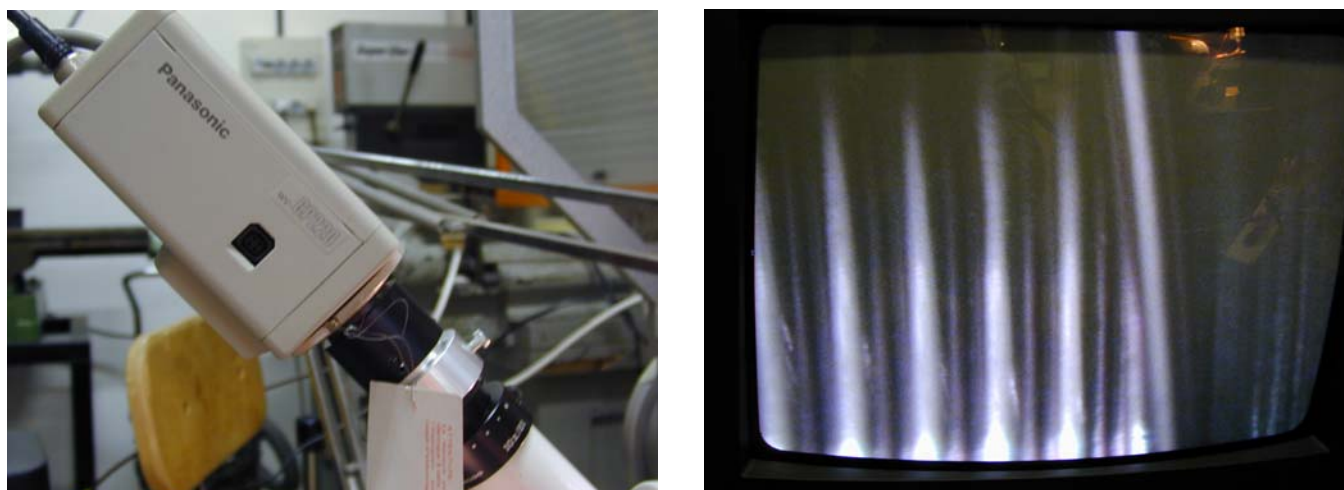


Рис. 7. Система контроля качества: микроскоп, телекамера, монитор.

режиме. Также были выявлены трудности, связанные с переходом с одного уровня на следующий. При этом невозможно избежать наложения двух витков друг на друга, что существенно уменьшает радиус кривизны сгиба, а это, в свою очередь, может привести к существенным потерям сигнала. Кроме того, при автоматическом режиме намотки не исключены пересечения соседних витков, что также ведет к потерям сигнала в линии (рис. 8 -9).

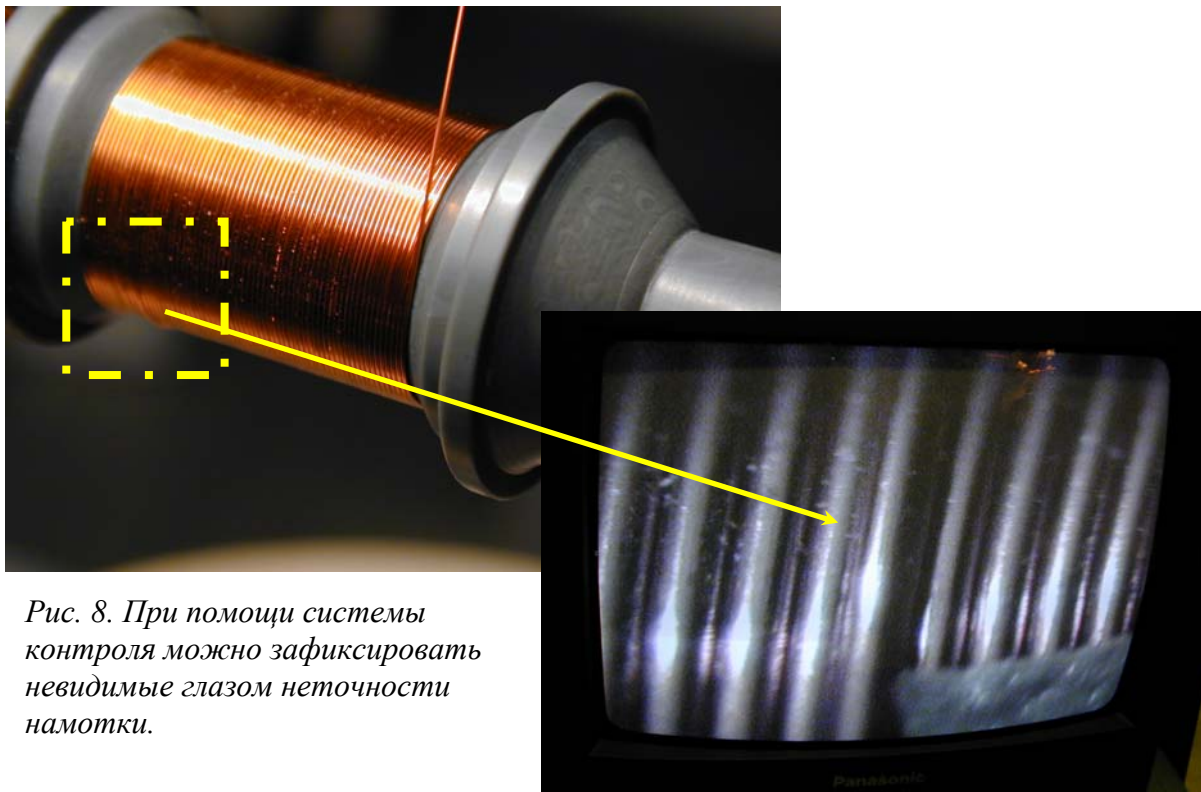


Рис. 8. При помощи системы контроля можно зафиксировать невидимые глазом неточности намотки.

Необходимо отметить, что любая незначительная погрешность в одном из слоев приводит к росту размеров дефекта в последующих слоях. Поэтому особенно важно не допустить возникновения пересечений между витками и промежутков между ними, сравнимых по ширине с толщиной проволоки или волокна.

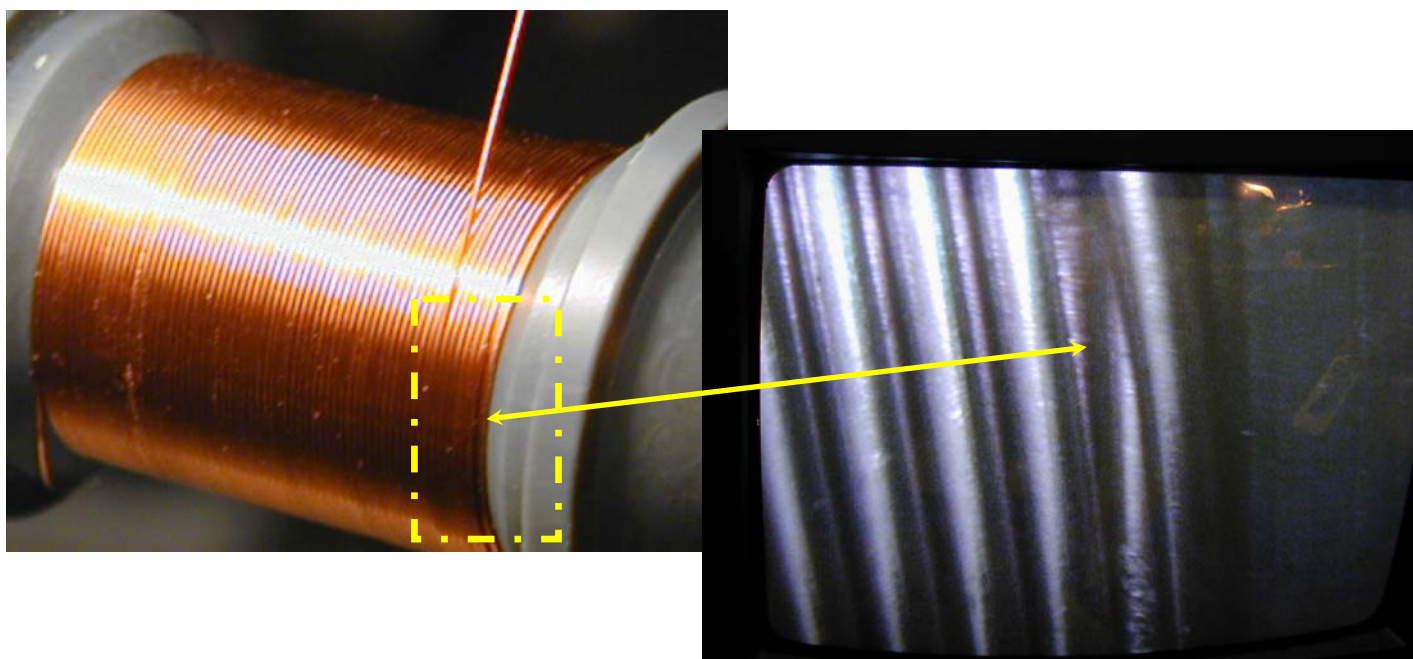


Рис. 9. Наиболее сложным моментом при наматывании является переход между слоями.

После выявления всех особенностей процедуры наматывания, были проведены пробы с использованием оптического волокна. Из-за малой толщины первичного слоя волокна, оно практически не видимо для глаза (рис. 10). Это создает дополнительные трудности при производстве гидрофона. Стоит отметить, что автоматический режим намотки не применялся при создании гидрофона, по причине высокой вероятности обрыва оптоволокна. Обрыв оптоволокна на любой стадии производства гидрофона означает невозможность продолжения процедуры и, как следствие, невозможность использования гидрофона в последующем. Процедура наматывания оптического волокна на основу гидрофона проводилась в ручном режиме. Необходимо отметить, что каждый слой оптоволокна покрывался клеем, что делало практически невозможным исправление обнаруженных ошибок.



Рис. 10. Изображение основы гидрофона с несколькими витками оптического волокна. Из-за малого диаметра оптоволокна качество процедуры невозможно проконтролировать без микроскопа.

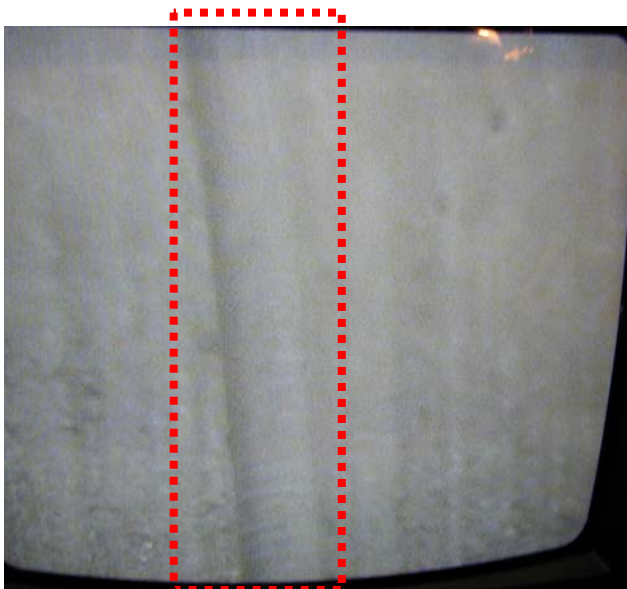


Рис. 11. При большом увеличении микроскопа отчетливо видно оптоволокно (слева), при нормальном увеличении микроскопа можно следить за качеством наматывания на небольшом участке поверхности основания гидрофона.



Рис. 12. Первый слой оптоволокна завершен.



Рис. 13. Изображение завершенного гидрофона, содержащего 9 слоев оптического волокна.

Первый слой оптоволокна ложится на поверхность основания гидрофона. На этом этапе можно добиться высокого качества намотки, высокой плотности витков, отсутствие пересечений оптоволокна. В следующих слоях начинают появляться дефекты, в точках

смены направления намотки и из-за возникновения промежутков между витками на неровной поверхности предыдущего слоя.

На рис. 13 изображен гидрофон, содержащий девять слоев оптоволоконна. Поверхность гидрофона имеет видимые неровности, нельзя исключать существование пересечений.

В дальнейшем, для улучшения контроля над качеством изготовления предполагается улучшить освещение поверхности. Также планируется исследовать возможность увеличения длины основного цилиндра гидрофона, чтобы увеличить длину оптоволоконна на первом слое. Кроме того, собирается аппарат для более точного наматывания в автоматическом режиме.

Контроль за процедурой производства гидрофона

Для проверки качества производства гидрофона недостаточно визуального наблюдения за качеством намотки. Радиус основы гидрофона составляет 7.5 мм. Такое значения кривизны сгиба оптического волокна близко к минимальному радиусу (табл. 1). Следовательно, помимо потерь из-за качественных дефектов при намотке существует вероятность потерь сигнала из-за малого радиуса цилиндра, на который ложится оптоволоконно при производстве.

Система контроля над потерей сигнала включает в себя лазерный источник света с возможностью регулировки мощности сигнала и регистрирующий блок, измеряющий мощность пришедшего сигнала.

Свободный конец оптоволоконна от катушки был соединен, при помощи спаивания, с кабелем оптоволоконна SMB-D1310B (табл. 1). Это обусловлено особенностью выхода источника светового сигнала, способного подавать сигнал лишь в данный тип оптоволоконна. Второй свободный конец от гидрофона был подключен к измерительному блоку (рис. 14).

Измерение интенсивности сигнала проводилось в мВт и dBm (логарифмическая единица измерения мощности сигнала по отношению к 1 милливатту). Ниже приведены

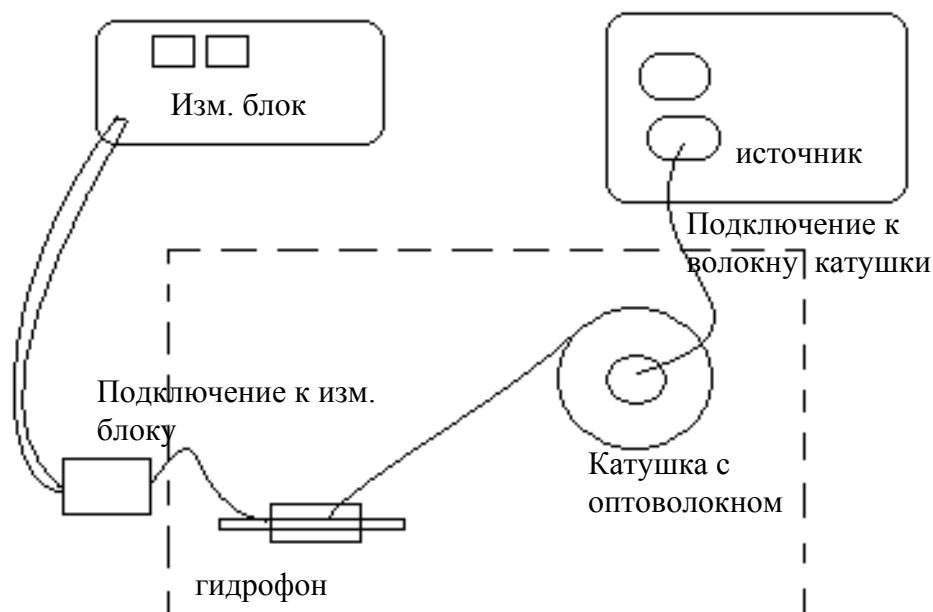


Рис. 14. Схематическое изображение системы контроля над потерями сигнала в линии оптоволоконна, содержащей гидрофон.

аналитические соотношения и таблица 2, описывающая численные соотношения этих величин.

$$S_{dBm} = 10 \text{Log} \left[\frac{W_{prim}}{W_{rec}} \right].$$

Где S_{dBm} – значение величины в dBm, W_{prim} и W_{rec} – значения в мВт для амплитуд начального и конечного сигнала.

Таблица 2.

dBm	Watts	dBm	Watts	dBm	Watts
0	1.0 mW	16	40 mW	32	1.6 W
1	1.3 mW	17	50 mW	33	2.0 W
2	1.6 mW	18	63 mW	34	2.5 W
3	2.0 mW	19	79 mW	35	3.2 W
4	2.5 mW	20	100 mW	36	4.0 W
5	3.2 mW	21	126 mW	37	5.0 W
6	4 mW	22	158 mW	38	6.3 W
7	5 mW	23	200 mW	39	8.0 W
8	6 mW	24	250 mW	40	10 W
9	8 mW	25	316 mW	41	13 W
10	10 mW	26	398 mW	42	16 W
11	13 mW	27	500 mW	43	20 W
12	16 mW	28	630 mW	44	25 W
13	20 mW	29	800 mW	45	32 W
14	25 mW	30	1.0 W	46	40 W
15	32 mW	31	1.3 W	47	50 W

Измерения в данном случае, по очевидным причинам, невозможно проводить в процессе процедуры намотки оптоволокну. Для измерения затухания сигнала в линии оптоволокну необходимо остановить станок, включить в линию источник и измерительный блок. Соединительный разъем источника возможно использовать только со стандартным заводским соединением, поэтому периодическое подключение/отключение линии не вносит ошибку в измерение. В разъем измерительного блока подключается оптоволокну малого диаметра, это вносит систематическую ошибку в измерения. Как было выяснено, интенсивность сигнала, подающегося на измерительный блок, может незначительно изменяться после очередного включения в линию. После серии подключений, была набрана статистика и рассчитана величина систематической ошибки.

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_i^N (\bar{w} - w_i)^2}}{N},$$

где w_i – измеренная амплитуда сигнала. Величина погрешности составила $\sigma \sim 3\%$ от средней величины $W = 0.144$ [мВт].

Измерения производились по окончании наматывания очередного слоя. Результаты измерений приведены на рис. 15. Учитывая вклады других погрешностей измерения, данные можно аппроксимировать прямой. Вклад в потерю сигнала вносят три независимые причины:

- 1) Естественное ослабление сигнала в оптическом волокне, связанное с его характеристиками (табл. 1);
- 2) Ослабление сигнала из-за малого радиуса кривизны витков, который близок к минимальному радиусу кривизны (табл. 1);
- 3) Потери сигнала при пересечении двух соседних витков, а также вызванные дефектами на поверхности гидрофона и сменой направления наматывания на концах основного цилиндра.

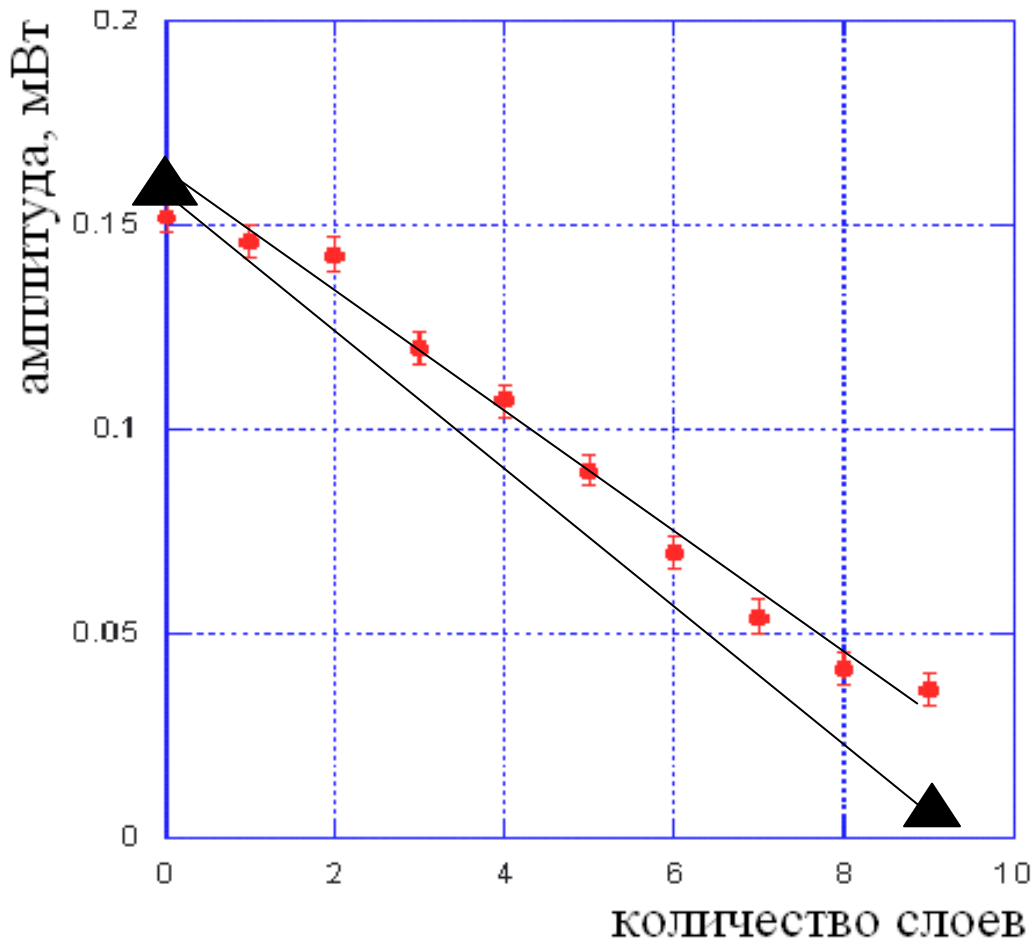


Рис 15. Зависимость амплитуды прошедшего сигнала от количества намотанных слоев оптического волокна. Кружки – данные, полученные при производстве описанного гидрофона, треугольники – данные, полученные при тестировании прототипа гидрофона.

Вклад дефектов в ослабление сигналов наиболее весом. Этот вывод сделан на основе измерений еще двух прототипов. Первый был изготовлен ранее и имел большое количество дефектов. Ослабление сигнала на линии с этим прототипом на 20 – 30 % больше, чем у изготовленного гидрофона. Также было измерено ослабление сигнала в прототипе, имеющем длину основного цилиндра в 3.5 раза больше. Первый слой оптоволокна ложится без дефектов. Измерения ослабления сигнала показали незначительную потерю сигнала в условиях отсутствия дефектов. Соответственно, поднимая качество процедуры, можно добиться низкого ослабления сигнала в гидрофоне.

Измерение чувствительности гидрофона

Установка для измерения чувствительности гидрофона состоит из лазерного источника, устройства формирования импульсов, линии оптоволоконна с зеркалами и гидрофоном, источника звука, светодиода, обрабатывающей электроники (Рис. 15).

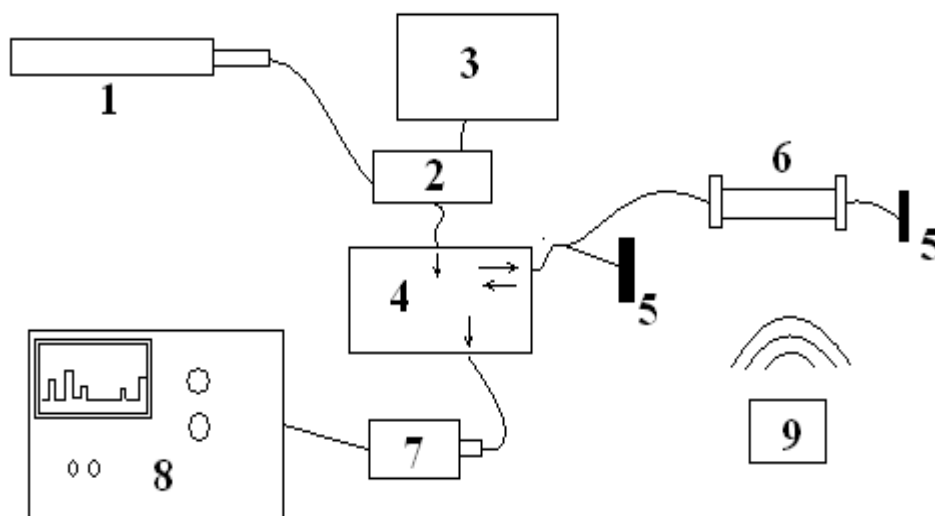


Рис. 15. Схема установки по измерению чувствительности гидрофона: 1) лазерный источник; 2) Модулятор; 3) Высокочастотный источник; 4) Направляющий световой триггер; 5) Зеркало; 6) Гидрофон; 7) Светодиод; 8) Электроника; 9) Источник звукового сигнала.

Лазерный источник излучает непрерывный сигнал на длине волны $\lambda = 1.319$ мкм. В качестве модулирующего световой импульс устройства используется ячейка Брэгга.

На выходе имеется два световых сигнала, которые следуют друг за другом с интервалом $\tau = 2L/v$, где L - длина линии оптоволоконна с гидрофоном между двумя зеркалами. Скорость света в световоде $v = c/1.5$. Импульсы проходят систему зеркал с гидрофоном, как было описано выше, и возвращаются в триггер, откуда выходят непосредственно на светочувствительный элемент [12-14].

Были проведены измерения интенсивности шума в зависимости от частоты в диапазоне до 12 кГц. Измерения производились в начале эксперимента и в конце, интервал между ними составил 3 часа. Результаты измерений шума показали, что уровень шума в исследуемом диапазоне стабилен (рис. 16). При низких частотах спектр шума можно аппроксимировать функцией $f = 1/v$ (рис. 17).

Измеренные в dBm величины амплитуд были пересчитаны в мВт:

$$S_{dBm} = 20 \log \left(\frac{w}{w_0} \right),$$

$$\frac{w}{w_0} = 10^{\frac{S_{dBm}}{20}}.$$

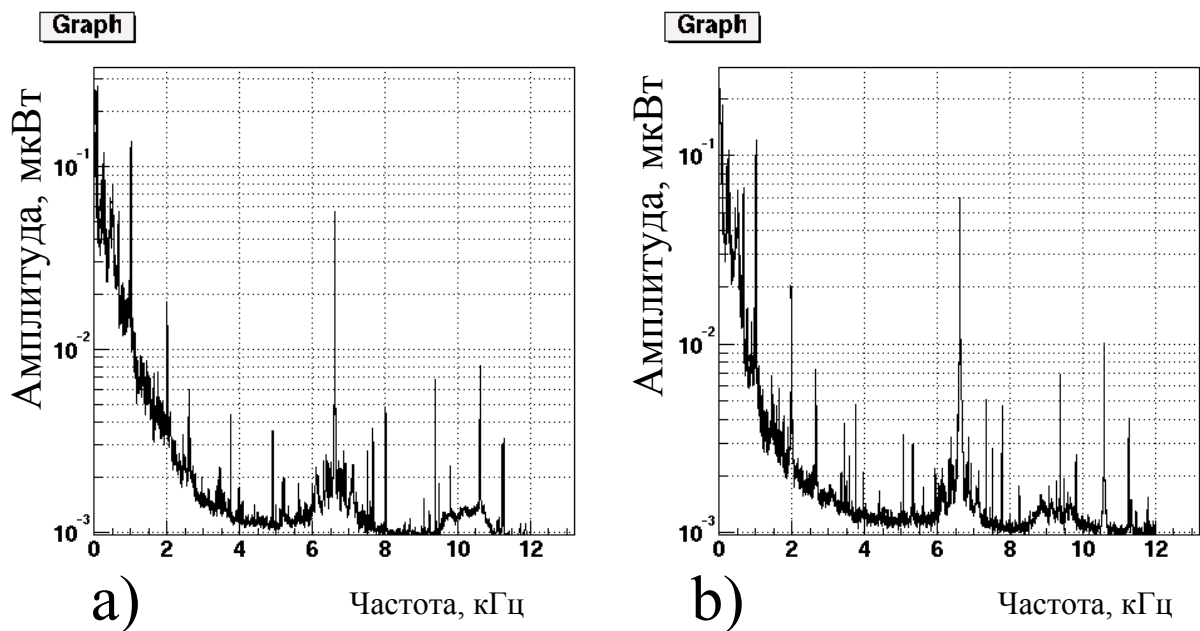


Рис. 16. Амплитуда шума в зависимости от частоты. а) Измерения проводились до эксперимента; б) через 3 часа.

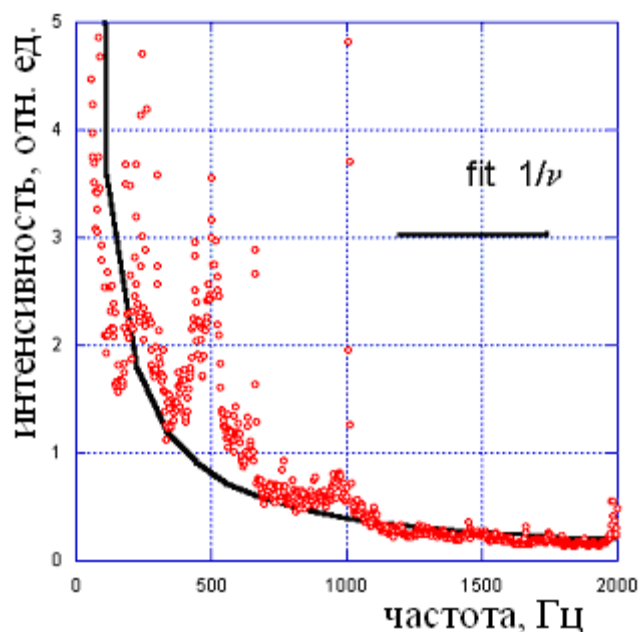


Рис. 17. Уровень шума в зависимости от частоты звука. В районе низких частот – до 2 кГц зависимость амплитуды шума от частоты хорошо аппроксимируется функцией, обратно-пропорциональной частоте. На более высоких частотах уровень шума практически постоянный (за исключением пиков, вызванных аппаратурой и другими источниками).

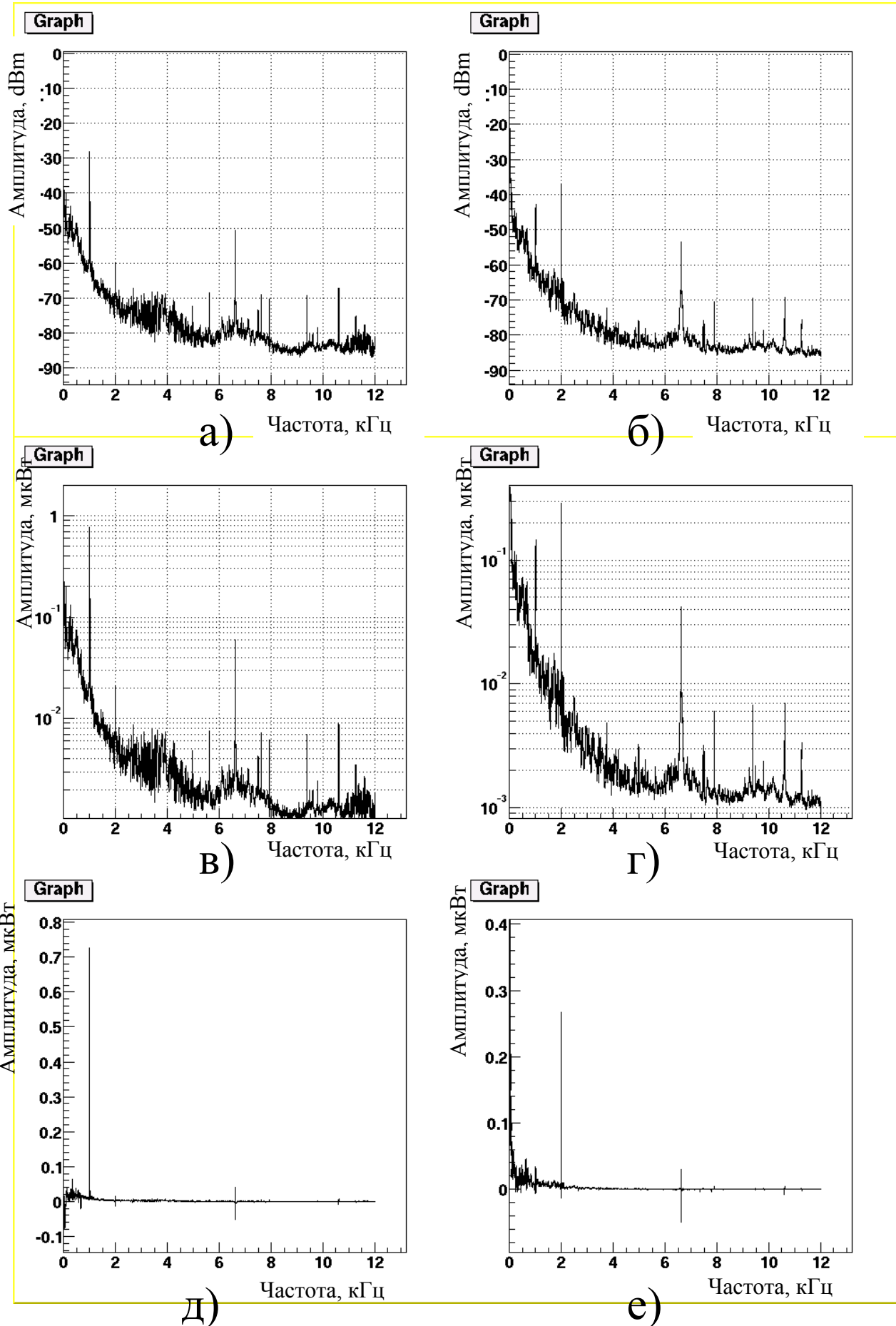


Рис 18. а,б) Сигнал от источника на частоте 1 и 2 кГц [dBm]; в,г) те же измерения в пересчете на мкВт; д,е) результат после вычета шума.

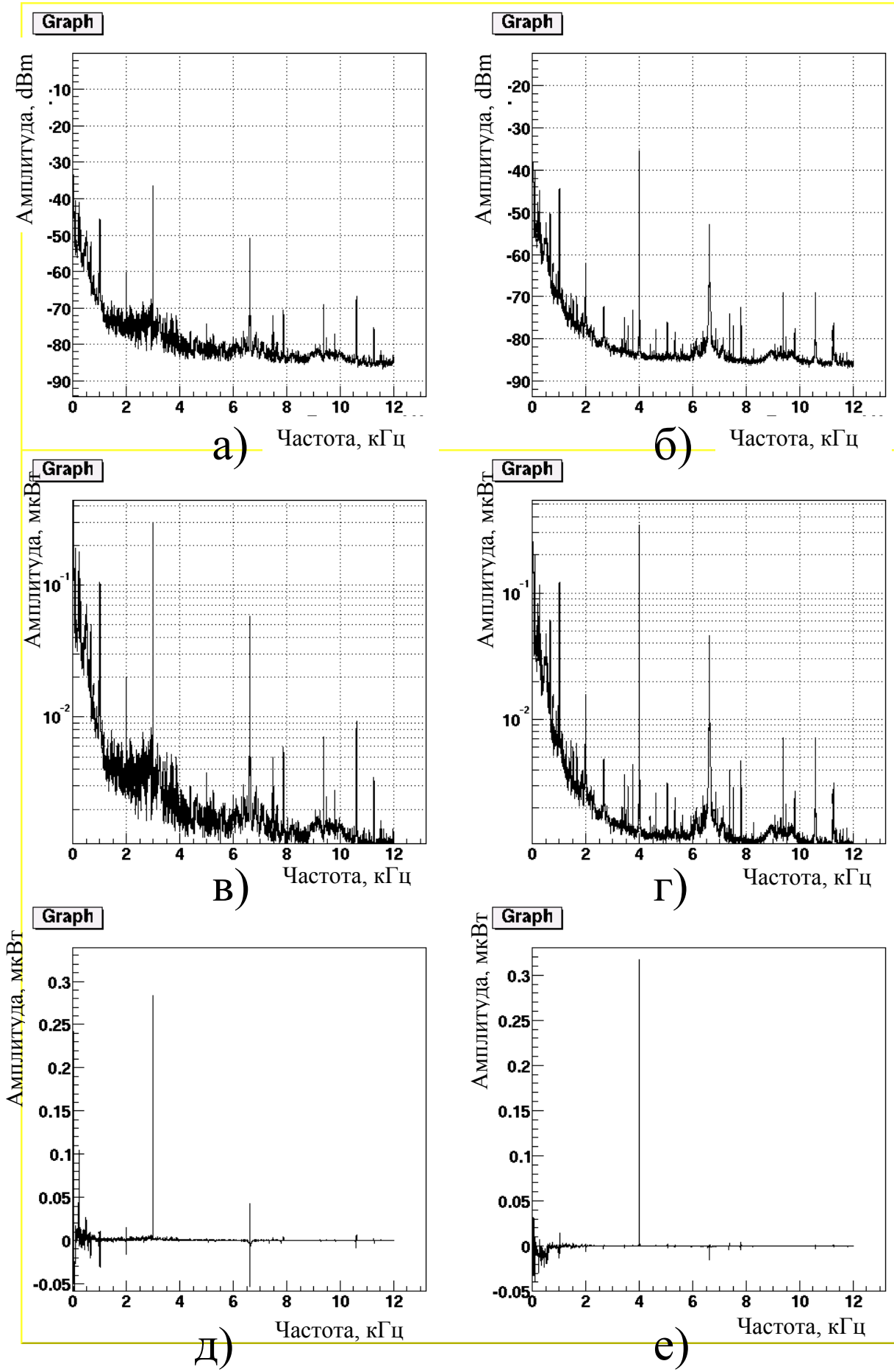


Рис 19. а,б) Сигнал от источника на частоте 3 и 4 кГц [dBm]; в,г) те же измерения в пересчете на мкВт; д,е) результат после вычета шума.

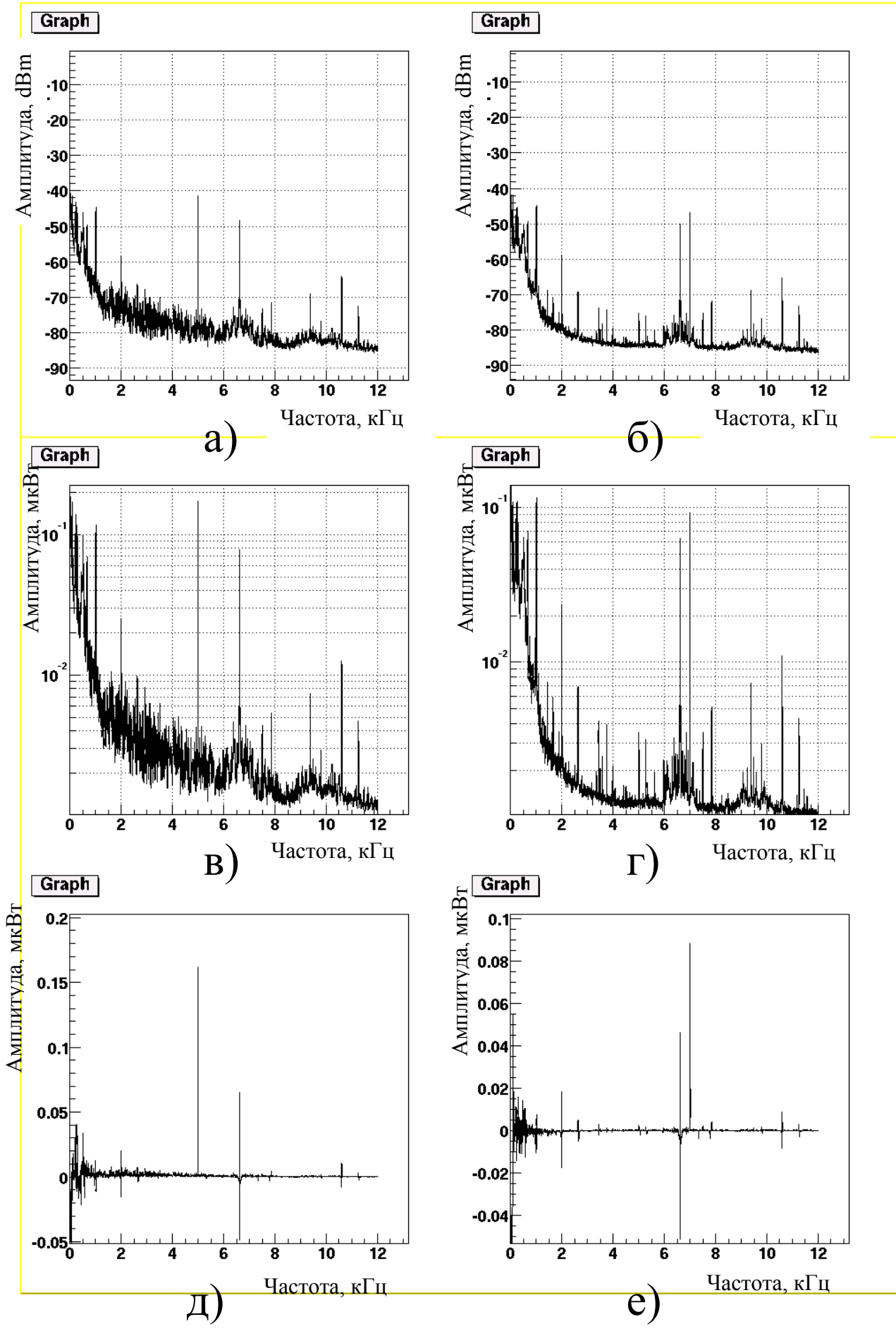


Рис 20. а,б) Сигнал от источника на частоте 5 и 7 кГц [dBm]; в,г) те же измерения в пересчете на мВт; д,е) результат после вычета шума.

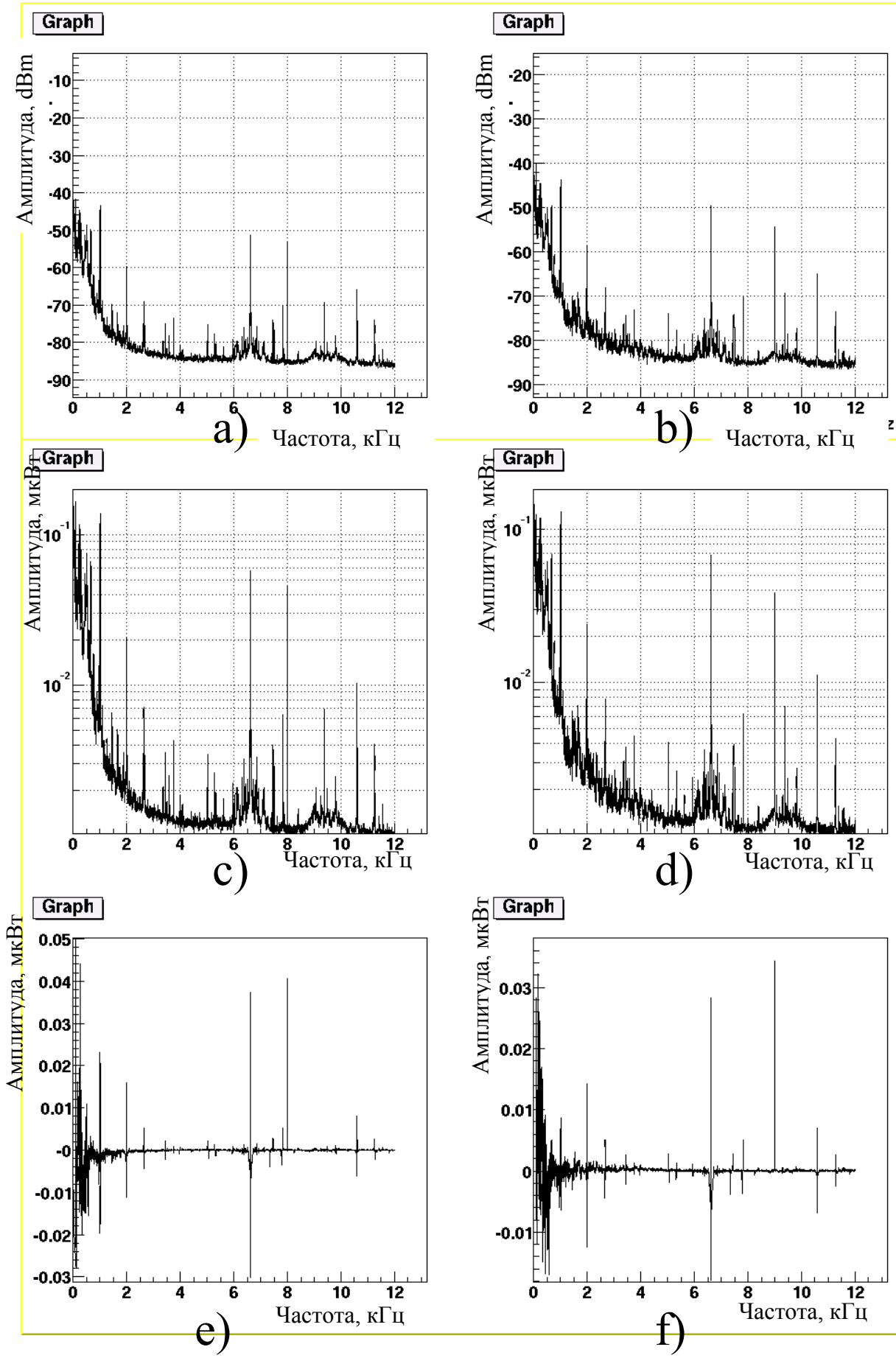


Рис 21. а,б) Сигнал от источника на частоте 8 и 9 кГц [dBm]; в,г) те же измерения в пересчете на мкВт; д,е) результат после вычета шума.

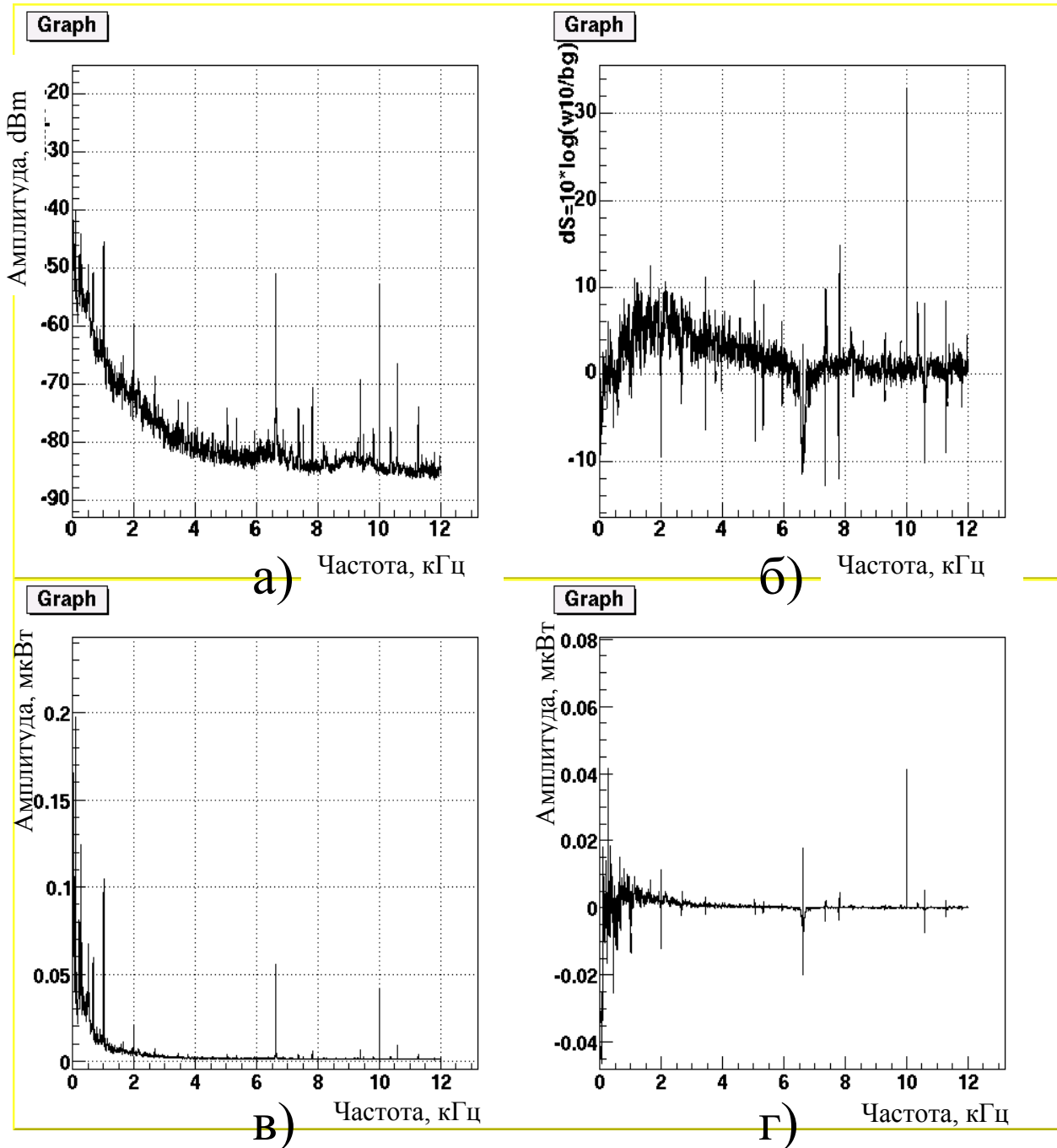


Рис 22. а) Сигнал от источника на частоте 10 кГц [dBm]; б) отношение сигнала к шуму в dBm; в) сигнал от источника в пересчете на мкВт; г) результат после вычета шума.

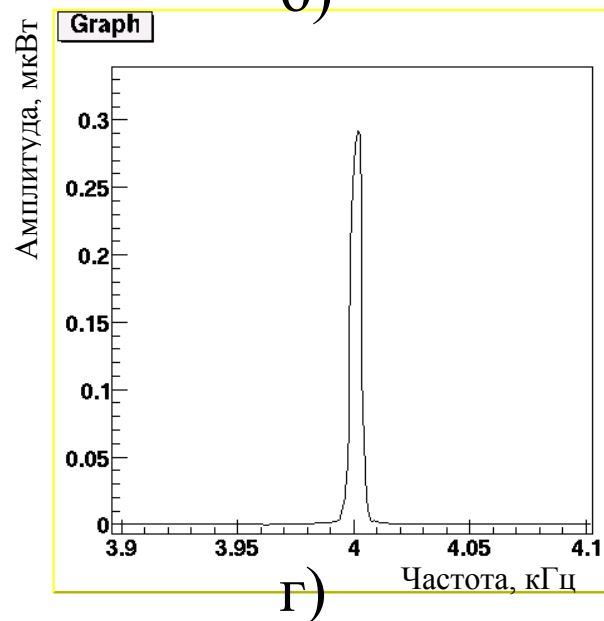
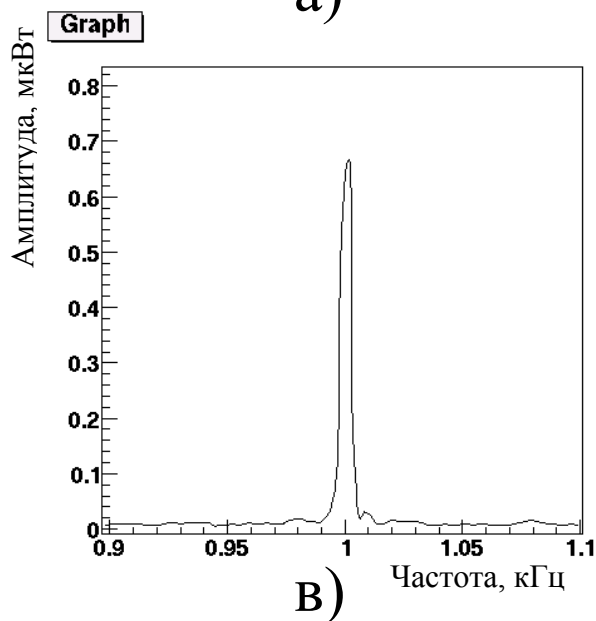
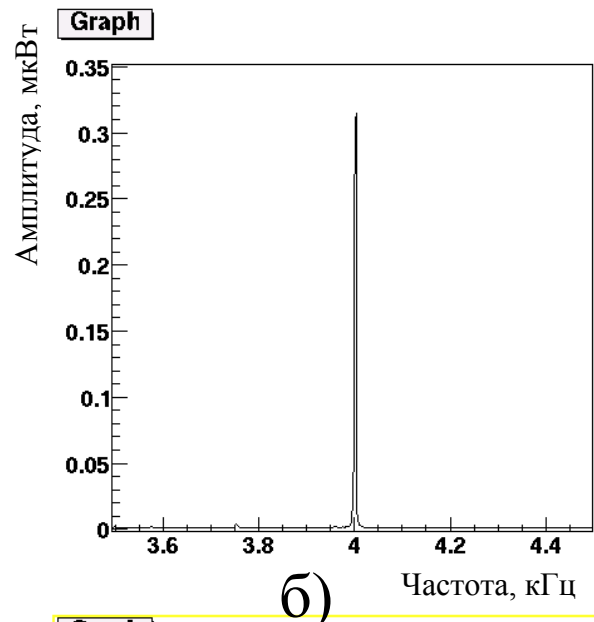
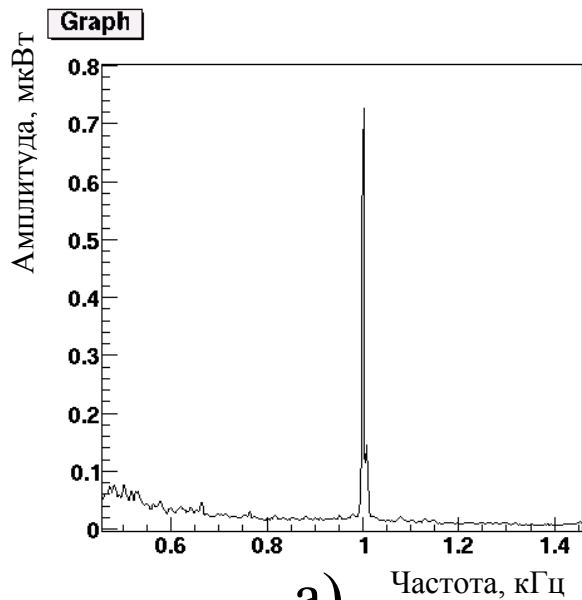


Рис 23. а,б) сигнал от источника на частоте 1 и 4 кГц представлен на увеличенной шкале +/- 0.4 кГц; в,г) сигнал после вычета шума на шкале - +/- 0.1 kHz.

На рис. 18-22, представлены результаты измерений акустического сигнала от источника звука с разными частотами. Измерения проводились в единицах dBm, результаты этих измерений показаны на графиках а) и б)*. Амплитуда сигнала пересчитывалась в мкВт, что представлено на графиках в) и г)*. Конечным результатом измерений являются графики, показывающие разницу амплитуд между измеренным сигналом и шумом.

* кроме рис. 22, на котором показаны результаты для одной частоты, поэтому порядок обозначения графиков иной.

На частоте, соответствующей частоте поданного сигнала от источника, хорошо различимы узкие пики. При подробном рассмотрении зарегистрированных пиков можно сделать вывод, что источник звука обладает хорошей монохроматичностью (рис. 23). Интенсивность сигнала в ходе измерений не менялась. Поэтому по данным, полученным из измерений, можно получить чувствительность гидрофона в зависимости от частоты. В таблице 3 представлены данные об амплитудах зарегистрированных сигналов на различных частотах. Эти же данные представлены в виде графика (рис. 24). На графике видно стабильное плато чувствительности до 5 кГц и спад чувствительности за ним. На частотах 8 – 10 кГц пик от источника звука имеет амплитуду, сравнимую с амплитудами постоянных фоновых сигналов от электроники, внешних источников и т.д.

Таблица 3.

Частота кГц	1	2	3	4	5	7	8	9	10
Амплитуда мкВт	0.32	0.27	0.28	0.32	0.17	0.08	0.04	0.03	0.04

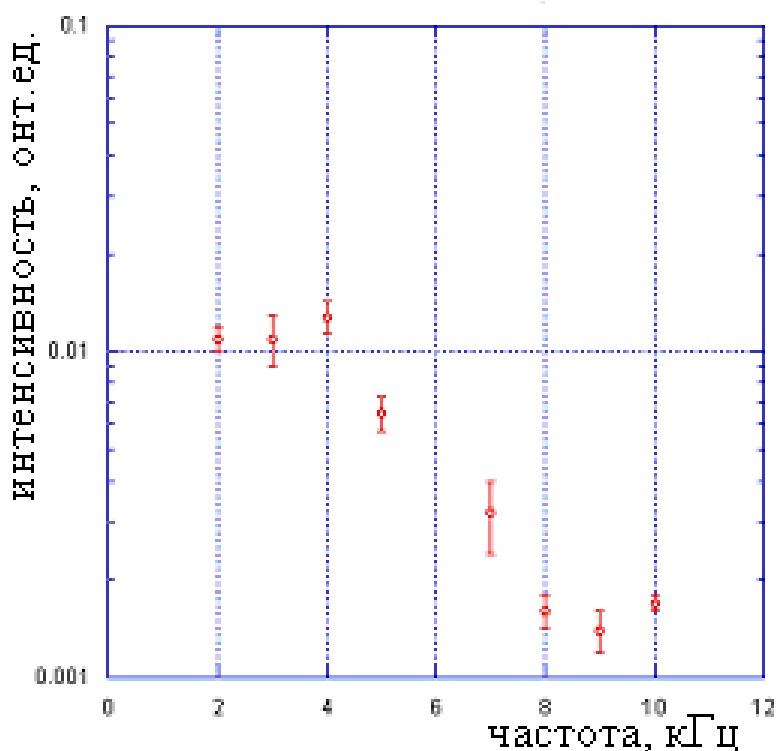


Рис. 24. Зависимость интенсивности зарегистрированного сигнала от его частоты.

Выводы

В ходе работы был создан гидрофон, принцип работы которого основан на сдвиге фаз между двумя сигналами, проходящими по оптическому волокну, намотанному на цилиндрическое основание гидрофона. При деформации гидрофона звуковой волной сдвиг фаз меняется линейно с длиной линии оптоволокна.

Для производства гидрофона разработана и применена аппаратура контроля качества, измерения ослабления сигнала. Также изучены и применены методы производства, точной намотки оптоволокна малого диаметра, методы измерений, подключение линии к измерительным приборам непосредственно в процессе производства.

Проведено тестирование работы гидрофона с применением монохроматического источника звука, в диапазоне от 1 до 10 кГц.

Исследования чувствительности гидрофона показали устойчивую работу гидрофона на частотах 1 – 6 кГц, что соответствует надобностям акустических методов регистрации нейтрино.

В дальнейшем планируется увеличить чувствительность гидрофона на частотах 10 кГц и выше. Увеличение чувствительности позволит получать информацию о сигнале на больших расстояниях, тем самым увеличить количество зарегистрированных сигналов. Число сигналов на одно событие существенно влияет на качество восстановления трека частицы.

Литература

1. Nikolai G. Lehtinen et al.:astro-ph/0104033 v1 3 Apr 2001
2. G`unter Sigl :astro-ph/0104291 v1 17 Apr 2001
3. R.U. Abbasi et all. astro-ph/0208301 v3 3 Dec 2004
4. J. Vandenbroucke et all. :astro-ph/0406105 v2 31 Aug 2004
5. Rolf Nahnauer Alternative Detection Methods for Highest Energy Neutrinos Zeuthen, Germany
6. Geoffrey A. Cranch, Philip J. Nash. JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 19, NO. 5, MAY 2001
7. Geoffrey A. Cranch, IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 3, NO. 1, FEBRUARY 2003
8. Clay K Kirkendall, A. Dandridge. J.Phys. D: 37 (2004) R197-R216
9. K. O. Hill et all. Appl. Phys. Lett. 62 (10), 1993
10. G. Pakulski et all, Appl. Phys. Lett. 62 (3), 1993
11. G. Melts et all, OPTICS LETTERS Vol.14, N15, 1989
12. P.C. Beard, T.N. Mills, APPLIED OPTICS Vol. 35, N4, 1996
13. J. Vandenbroucke et all, The Astrophysical Journal, 621:301-312, 2005
14. C. I. Merzbacher, Smart Mater. Struct. 5 (1996) 196-208