

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ, СОЗДАВАЕМОГО В ВОДЕ ПУЧКОМ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 50 МЭВ

В.Б. Бычков¹, В.С. Демидов², Е.В. Демидова², А.Н. Ермаков³, О.Д. Ершова³,
Б.С. Ишханов³, В.П. Масляный¹, А.Ю. Соколов², Н.А. Халдеева²

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений;* ² *Институт теоретической и экспериментальной физики;*

³ *Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ*

E-mail: olga.yershova@gmail.com

At the MSU SINP electron accelerator, a space-time dependence of the acoustic pressure generated in water by an electron beam of 50 MeV energy was obtained. Measurements were carried out in 100 points located along the line parallel to the beam axis at the distance of 6.5 cm from the axis. At a two-dimensional diagram (distance-time) two signal tracks were observed from two sound sources: a cylindrical acoustic antenna generated by the electron beam, and an area of the beam entrance cap which divides the water medium from the air.

Явление возникновения акустического поля при прохождении ионизирующих частиц через вещество представляет интерес для многих областей физики. В частности, на нем основана идея акустической регистрации космических нейтрино сверх- и ультравысоких энергий в естественных водных бассейнах. Получение точных экспериментальных данных о спектре таких нейтрино позволит ответить на вопросы о механизмах образования космических лучей сверхвысоких энергий и астрофизических объектах, которые могут быть их источниками, а также проверить ряд космологических моделей образования Вселенной.

Как известно, при взаимодействии нейтрино с веществом образуются заряженные лептоны (электроны, мюоны), инициирующие образование электромагнитно-адронных ливней. Размеры ливней при сверхвысоких энергиях нейтрино составляют до нескольких сотен метров в длину и десятки метров в поперечнике. Согласно гипотезе Аскарьяна [1], подтвержденной экспериментальными данными, систематизированными в монографии [2], прохождение заряженных частиц через вещество сопровождается механическими колебаниями среды, спектр которых в условиях планируемых экспериментов находится в диапазоне частот от 1 до 200 кГц. Предполагается, что, зарегистрировав с помощью большого числа гидрофонов колебания от электромагнитно-адронного ливня и измерив их гидроакустическое давление, можно оценить энергию нейтрино как источника ливня, а также, определив направление развития ливня и его положение в пространстве, установить направление первичного нейтрино.

На этапе планирования экспериментов важно знать ожидаемые величины откликов регистрирующей аппаратуры. При экспериментальном исследовании изучаемого явления акустические сигналы от ливней имитируются сигналами, возникающими в небольших бассейнах при торможении в воде пучков заряженных частиц невысоких энергий. Опыты проводятся на ускорителях

частиц, интенсивности которых позволяют обеспечить энерговыделение, близкое к тому, которое ожидается в нейтринных экспериментах. В основном исследования проводились с протонами [3 - 6]. Немногочисленные эксперименты с электронами были выполнены более 20 лет назад [2,7]. В них зарегистрированы 5 сигналов на расстояниях от 3 до 18 см от оси пучка.

Электронно-фотонные ливни, возникающие при распространении в среде электронов, образуют акустическую антенну квазицилиндрической формы с переменным диаметром. Целью эксперимента являлась регистрация акустических сигналов, излучаемых антенной в ряде точек на расстояниях, сравнимых с длиной антенны и значительно превышающих ее поперечные размеры.

Эксперимент проводился на импульсном разрезном микротроне RTM70 НИИЯФ МГУ. 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 [6,8]. Бассейн имел форму параллелепипеда размерами 50,8 x 52,3 x 94,5 см. На рис. 1 представлен эскиз бассейна с необходимыми для анализа данными 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

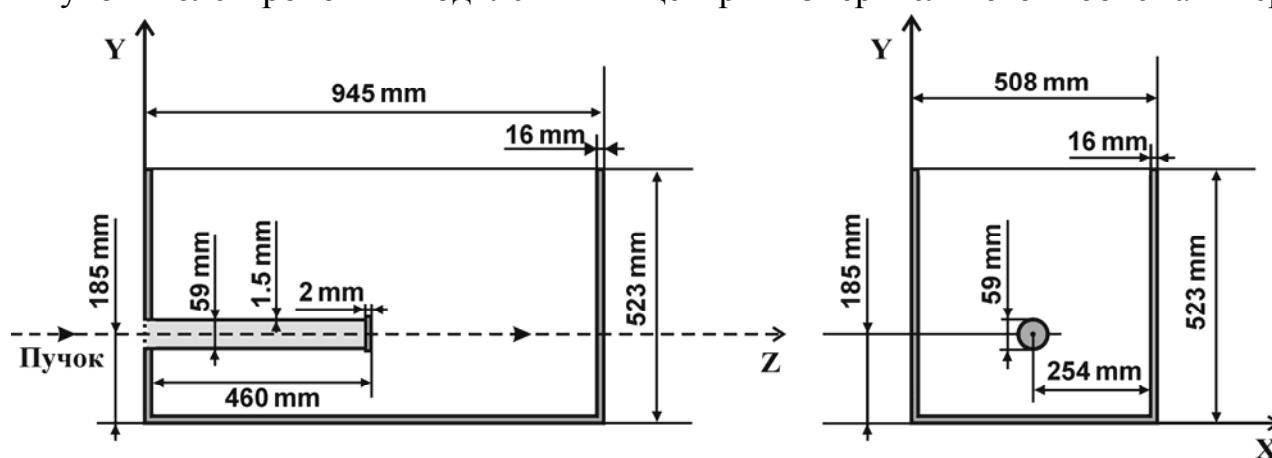


Рис.1. Схема эксперимента

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.

Измерения проводились с помощью широкополосного (до 160 кГц) высокочувствительного (>1 мВ/Па) измерительного гидрофона. В качестве преобразователя в гидрофоне используется пьезоэлектрическая керамика с тангенциальной поляризацией. Гидрофон подключался через собственный предусилитель, а также два усилителя, дававших последовательно усиление 50 дБ в полосе частот 20 Гц - 200 кГц и 10 дБ в полосе частот 10-100 кГц.

Считывание информации производилось с помощью 2-лучевого осциллоскопа TEKTRONIX TDS 3032, управляемого с помощью ПК. Время наблюдения сигнала составляло 1 мс, каждое измерение содержало 10^4 точек по 0.1 мкс. Запуск осциллоскопа производился синхроимпульсом от генератора, управляющего работой ускорителя, и предшествовал по времени приходу пучка на мишень приблизительно на 4 мкс.

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 дистанционным управлением. Шаг сканера составлял 4.45 мм. Координата Z начальной точки измерения совпадала с началом акустической антенны.

На рис. 2 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

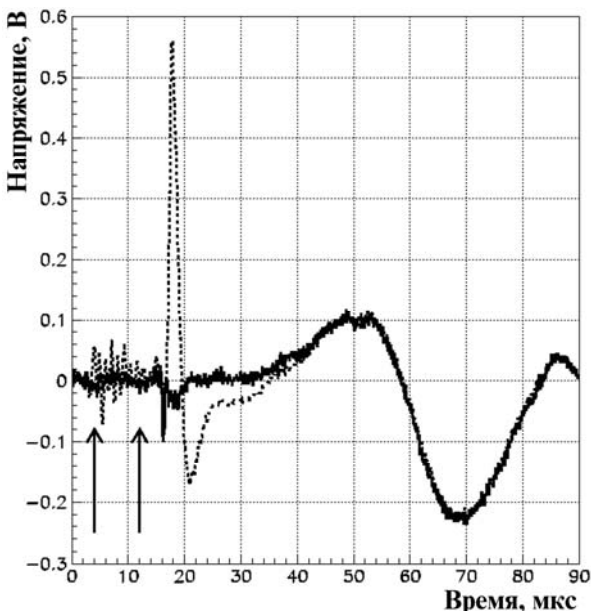


Рис.2. Сигнал с гидрофона до и после вычитания наводки. Подробные пояснения даны в тексте.

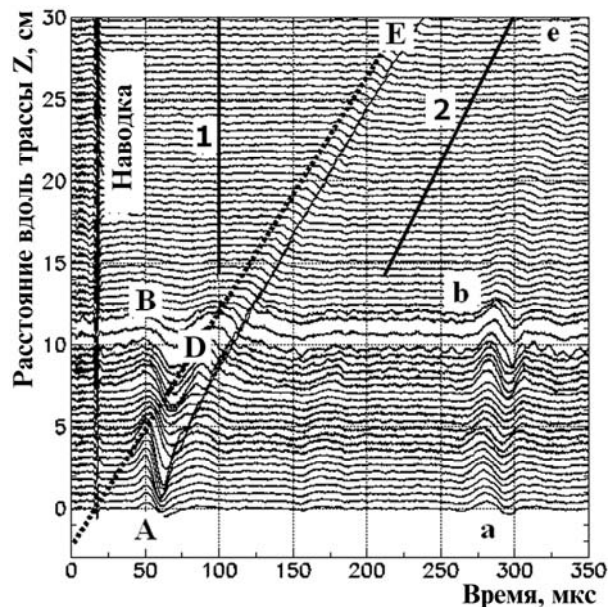


Рис.3. Пространственно-временная структура акустического поля, создаваемого пучком электронов в воде.

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 отсутствие электронного пучка. Результат вычитания показан на рисунке сплошной линией. Видно, что процедура вычитания наводки позволяет существенно подавить влияние паразитных сигналов при $t < 36$ 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.

На рис. 3 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.

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 [7] и протонным [6,8] пучками. Пунктирная линия на рисунке – результат аппроксимации точек, соответствующих началу акустических сигналов, линейной зависимостью

$$R_i = V t_i + r, \quad (1)$$

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. Для установления момента t_i прихода сигнала применялся алгоритм, использующий аппроксимацию акустического сигнала в районе минимума гауссианом. Численные значения скорости звука V и расстояния r до источника звука в начальной точке сканирования находились в

результате аппроксимации 57 точек линейной зависимостью (1). Найденное значение скорости звука на данной траектории составило $V = (1435 \pm 12)$ 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 ± 15) м/сек. Значения совпадают в пределах двух стандартных 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 рис. 3, где при $t > 90$ мкс сигналы следуют аппроксимирующей прямой, а при меньших t отклоняются от нее.

Заключение

В результате эксперимента впервые получена детальная пространственно-временная картина акустического поля, создаваемого в воде интенсивным пучком электронов, на прямой, параллельной оси пучка. Методика эксперимента исключала влияние отраженных волн в области наблюдения. Используемый 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 этого эффекта предполагается установить в дальнейших экспериментах.

1. Г.А. Аскаръян. Атом. энергия. 1957, Т. 3, С. 152.
2. Л.М. Лямшев. Радиационная акустика. - М.: Наука. Физматлит, 1996.
3. L. Sulak, T. Armstrong T., H. Baranger et al. Nuclear Instruments and Methods, 1979. V.161, №2, P. 203.
4. В.И. Албул, В.Б. Бычков и др. Приборы и техника эксперимента, 2001, №3, с. 50.
5. В.И. Албул, В.Б. Бычков, С.С. Васильев и др. ПТЭ, 2004, №4, с. 94.
6. В.И. Албул, В.Б. Бычков, С.С. Васильев и др. ПТЭ, 2004, №4, с. 89.
7. В.А. Балицкий, В.С. Городецкий, Л.М. Лямшев и др. Акустический журнал, 1985, т.31, №5, с. 47.
8. В.И. Албул, В.Б. Бычков, С.С. Васильев и др. Акустический журнал, 2005, т.51, №1, с. 47.