

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



СЗУЧ. 12

А-441

4/11-74

P13 - 7474

851/2-74

В.А.Акуличев, В.Г.Гребинник, В.А.Жуков, А.М.Копова,
В.А.Красильников, А.П.Маньч, Г.И.Селиванов,
В.П.Юшин

ЖИДКОВОДОРОДНАЯ
УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ПУЗЫРЬКОВАЯ КАМЕРА

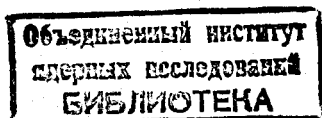
1973

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

P13 - 7474

В.А.Акуличев,¹ В.Г.Гребинник, В.А.Жуков, А.М.Копова,¹
В.А.Красильников,¹ А.П.Маныч, Г.И.Селиванов,²
В.П.Юшин¹

**ЖИДКОВОДОРОДНАЯ
УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ПУЗЫРЬКОВАЯ КАМЕРА**



¹ Акустический институт АН СССР, Москва.

² Институт физики высоких энергий, Серпухов.

Создание ультразвуковых пузырьковых камер /УЗПК/ представляется перспективным в связи с их быстроедействием и возможностью реализации селективного отбора полезных событий с помощью внешних логических систем.

После того, как были получены треки ионизирующих частиц в гелиевой УЗПК^{/1/} и показана принципиальная возможность формирования треков в жидком водороде под действием ультразвука^{/2/}, дальнейшие исследования были направлены на создание жидководородной УЗПК, представляющей наибольший интерес для физики элементарных частиц. Это привело к необходимости решения сложных технических задач, обусловленных тем, что для достижения чувствительности к ионизирующему излучению в жидком водороде необходимо было создать большие амплитуды давления ультразвукового поля $P_m \approx 2-3$ бар при малом удельном акустическом сопротивлении среды $\rho c = 0,05 \cdot 10^5$ г/см² сек. В связи с тем, что применение обычных пьезокерамических элементов не позволило реализовать такие давления^{/3,4/}, в дальнейшем использовались либо составные армированные излучатели /преобразователи/^{/4/}, обладающие более высокими прочностью и эффективностью, либо излучатели с четвертьволновым переходным слоем^{/5/}, позволяющим улучшить согласование их со средой. С помощью ультразвуковых систем, составленных из двух излучателей, формирующих постоянных воли, удалось получить треки ионизирующих частиц в жидком водороде под действием ультразвука с частотой 30 кгц при пережатии /разности между статическим давлением в жидкости P_0 и давлением насыщенных паров P_s / $\Delta P \approx 0$.^{/4/} В работе^{/5/} треки были получены в ультразвуковом поле с частотой 300 кгц при $\Delta P > 0$.

Исследования ^{/4/} показали, что формирование треков в УЗПК в значительной мере ограничивается возникновением паразитного кипения /кавитации/ на поверхности излучателей, что является причиной падения входного импеданса излучателей, уменьшения их коэффициента полезного действия и понижения давления ультразвукового поля при превышении некоторых пороговых значений электрических напряжений. Сокращение длительности ультразвуковых импульсов, а также использование излучателей с высоким коэффициентом полезного действия может существенно уменьшить влияние кавитационных явлений и тем самым увеличить эффективность ультразвукового поля. Кроме того, применение систем парных излучателей, создающих поля стоячих волн, позволяет увеличить входной импеданс излучателей и уменьшить потери энергии.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований треков ионизирующих частиц в жидководородной УЗПК с системой двух идентичных ультразвуковых излучателей, создающих поле стоячих волн на частоте $f = 38,4$ кГц. Применялись составные пьезокерамические армированные излучатели, устройство одного из которых показано на рис. 1. В отличие от излучателей, использованных в работе ^{/4/}, они имели более простую и надежную конструкцию, обеспечивающую в водородной среде коэффициент полезного действия $\eta_{ам} \approx 0,35$ /в бегущей волне/. В качестве материала активных элементов излучателей применялась пьезокерамика ЦТС-23.

На рис. 2 схематически показано расположение излучателей в рабочем объеме жидководородной пузырьковой камеры ^{/6/}, расширительная система которой во время эксперимента не использовалась. Здесь же указано условно распределение давления в поле стоячих волн между излучателями. При рабочей температуре $T_0 = 27^\circ$ К излучатели располагались на расстоянии $a = 90$ мм, что соответствовало четырем длинам волн ультразвукового поля. Это приводило к образованию 9 зон чувствительности к ионизирующему излучению. Диаметр излучающей поверхности преобразователей был равен 70 мм.

На рис. 3 представлена фотография треков π^- -мезонов с энергией ~ 340 Мэв в жидководородной УЗПК. Излуча-

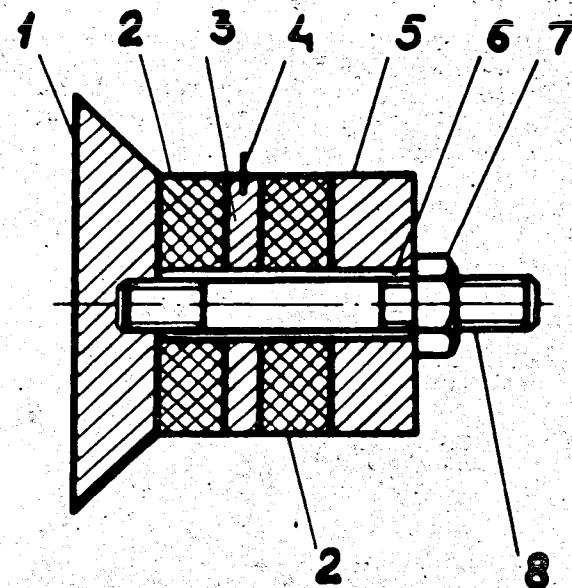


Рис. 1. Составной ультразвуковой излучатель. 1 - излучающая металлическая шайба, 2 - пьезокерамические шайбы, 3 и 5 - металлические шайбы, 4 - клемма, 6 - изолятор, 7 - армирующая гайка, 8 - силовой армирующий стержень.

тели возбуждались ультразвуковыми импульсами длительностью 4,5 мсек. Импульс пучка от ускорителя имел длительность $\sim 0,3$ мсек /10-15 периодов ультразвукового поля/ и вводился в камеру примерно через 1 мсек после начала каждого импульса. Интервал времени между фотосъемкой и моментом ввода пучка составлял 2 мсек, что соответствовало приблизительно 80 периодам ультразвукового поля. Пучок π^- -мезонов перед входом в камеру проходил через коллиматор диаметром 6 см и содержал около 300 частиц в каждом импульсе ускорителя. Однако в УЗПК регистрировалась только часть частиц от пучка ускорителя, проходящих вблизи осевой линии излучающей системы, что было обусловлено неравномерным распределением амплитуды давления ультразвукового поля на поверхности излучателей. Диаметр чувствительной области составлял $\sim 2-3$ см. Треки частиц регистриро-

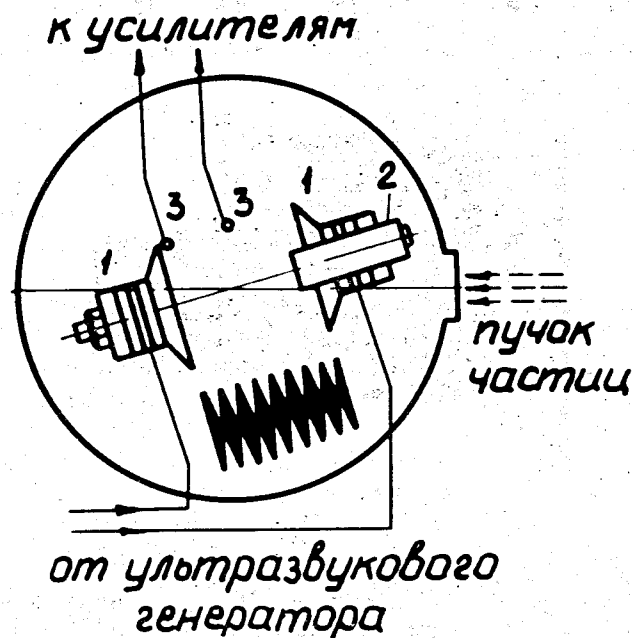


Рис. 2. Расположение ультразвуковых систем в УЗПК. 1 - ультразвуковые излучатели, 2 - устройство для перемещения излучателя, 3 - приемники ультразвука.

вались при пережатии $\Delta P \approx 0,35$ бар и напряжении на излучателях $U = 1,5$ кв, которое, согласно приведенным ниже оценкам, соответствовало амплитуде давления ультразвукового поля $P_m \approx 3,0$ бар.

На рис. 4а приведена функция распределения по радиусам одиночных паровых пузырьков треков ионизирующих частиц в единице чувствительного объема жидкости. Распределение хорошо аппроксимируется нормальным законом с наиболее вероятным значением для радиусов пузырьков $R = /0,17 \pm 0,006/$ см, превышающим расчетное ^{17/} в 2-3 раза.

На фотографиях имеется также значительное количество сплошных треков, для которых было невозможно построить функцию распределения по радиусам одиночных пузырьков. На рис. 4б такая функция приведена для радиусов поперечных сечений сплошных треков.

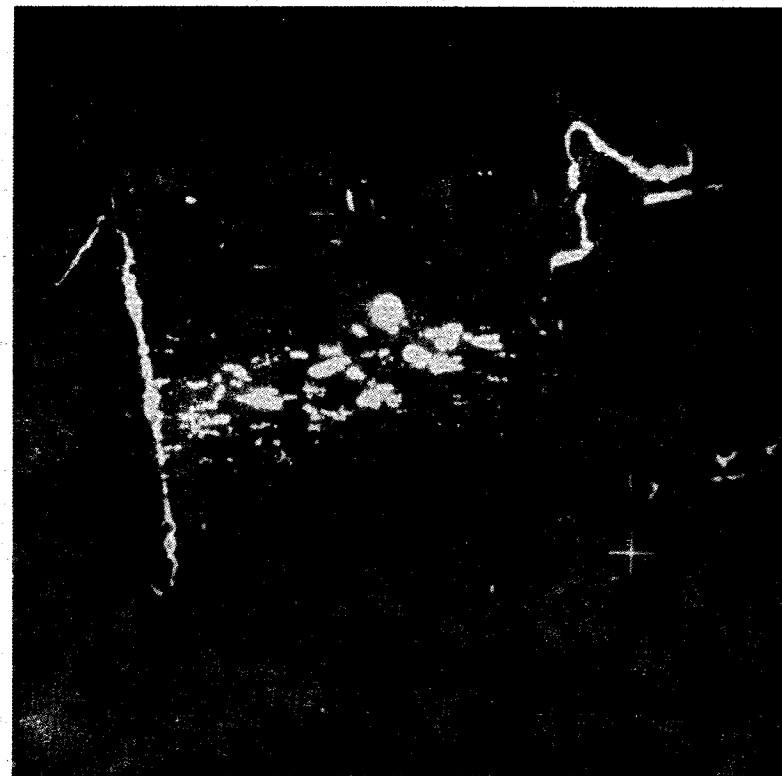


Рис. 3. Треки отрицательных пионов в поле стоячих волн в жидководородной УЗПК.

Возникновение сплошных треков может быть обусловлено как прохождением через рабочий объем УЗПК частиц с высокой ионизирующей способностью, образовавшихся вследствие взаимодействия пучка π^- -мезонов с материалом ультразвукового излучателя, так и особенностями роста паровых пузырьков в ультразвуковом поле. Вследствие большой длительности импульса пучка по сравнению с периодом ультразвукового поля зародышевые пузырьки начинают свой рост в различных фазах ультразвукового давления. Кроме того, общее время роста пузырьков до видимых размеров может быть различным из-за соизме-

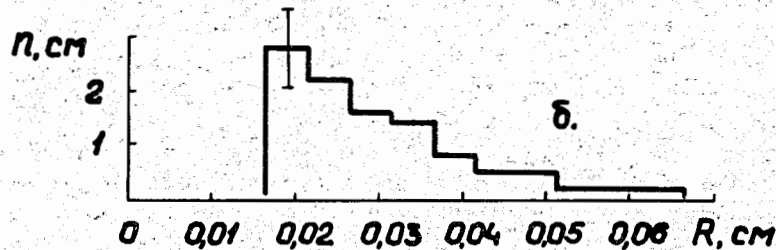
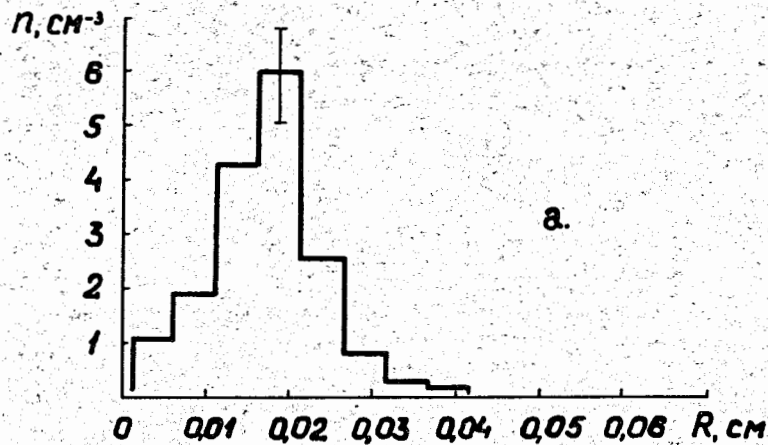


Рис. 4. Распределение пузырьков в треках по размерам в единице объема жидкости. а - распределение одиночных пузырьков, б - распределение сплошных треков.

римости длительности импульса пучка и интервала времени между фотосъемкой и прохождением частиц в камере. Возможно также, что в случае сплошных треков, образованных частицами с высокой ионизирующей способностью и имеющих большую плотность пузырьков, существенным становится взаимодействие пузырьков в ультразвуковом поле, и их динамика отличается от динамики одиночных пузырьков.

В жидководородной УЗПК удается создавать необходимые давления ультразвука, применяя системы излучателей, формирующих поля стоячих волн, поскольку в этом случае повышается эффективность излучения и уменьшаются внутренние механические напряжения в материале преобразователей за счет увеличения входного импеданса на их излучающих поверхностях. Такие волны могут быть созданы системой двух парных идентичных излучателей. Максимальные давления в подобных системах реализуются при расстоянии между поверхностями излучателей a , кратном целому числу длин волн λ в жидкости, что соответствует случаю резонансного размера рабочей области^{/8/}. При этом для идентичных преобразователей амплитуда давления ультразвукового поля может быть выражена в виде

$$P_m = \nu U_m \left[1 + \frac{\rho c S}{z} (1/\eta_{ам} - 1) \right]^{-1}, \quad /1/$$

где ν - коэффициент электромеханической трансформации излучателя на единицу поверхности S , U_m - амплитуда электрического напряжения, z - входной импеданс излучателя, $\eta_{ам}$ - акустико-механический коэффициент полезного действия излучателя, измеренный в условиях излучения бегущей волны в среде с импедансом $\rho c S$.

Входной импеданс z в рассматриваемой системе существенно зависит от величины aa , где a - коэффициент поглощения ультразвука в рабочем объеме жидкости^{/8/}. При очень большом поглощении, когда $aa \gg 1$, в системе реализуются не стоячие, а бегущие волны и $z \approx \rho c S$. Тогда P_m можно оценить по формуле

$$P_m \approx \nu U_m \eta_{ам}. \quad /2/$$

При $aa \ll 1$ входной импеданс может быть выражен как $z \approx 2\rho c S / aa$. Тогда, согласно /1/,

$$P_m \approx \nu U_m \left[1 + \frac{aa}{2} (1/\eta_{ам} - 1) \right]^{-1}. \quad /3/$$

Этот случай, как будет показано ниже, соответствует характерным режимам исследуемой жидководородной УЗПК.

Как следует из формулы /3/, на величину P_m накладывает существенное ограничение поглощение ультразвука, определяемое коэффициентом /9/

$$a = a_1 + a_2, \quad /4/$$

состоящим из коэффициента обычного поглощения a_1 , обусловленного вязкими и релаксационными потерями в жидкости, и коэффициента поглощения a_2 , вызванного затуханием ультразвука вследствие затрат энергии на рост паровых пузырьков треков. Средняя концентрация таких пузырьков в нашем случае составляет примерно $n \approx 10 \text{ см}^{-3}$. Это позволяет оценить согласно работе /9/ коэффициент поглощения $a_2 \approx 10^{-2} \text{ см}^{-1}$. Значение a_2 существенно превышает a_1 , величина которого для жидкого водорода составляет $10^{-7} \text{ см}^{-1} /10/$.

Следует отметить, что a_2 соответствует потерям при сформировавшихся треках ионизирующих частиц, которые до ввода их в камеру не влияли на установление ультразвукового поля в ее рабочем объеме. Величину a_2 можно уменьшить разумным выбором частоты ультразвукового поля. Для этого необходимо, чтобы выполнялось условие $f < f_0$, где f_0 - резонансная частота пузырьков. В нашем случае наиболее вероятными являются пузырьки радиуса $R \sim 0,02 \text{ см}$, для которых $f_0 \sim 100 \text{ кгц}$, однако в треках наблюдаются также пузырьки $R \sim 0,05 \text{ см}$, приводящие к резонансному поглощению ультразвука на рабочей частоте.

Согласно приведенным оценкам, $a a \sim 0,1$. Поэтому расчеты давления P_m можно производить по формуле /3/, которая остается справедливой до тех пор, пока на поверхности излучателей не возникает паразитное кипение /кавитация/. В этом случае волновое сопротивление становится равным $\rho_k c_k$, где ρ_k и c_k - соответственно плотность среды и скорость звука в ней при кавитации. Величина $\rho_k c_k < \rho c$, что обусловлено в основном существенным уменьшением скорости звука c_k при возникновении кавитации /11/. В этом случае входной импеданс становится равным $z_k \approx 2\rho_k c_k S / a_k a$, т.е. уменьшается в основном вследствие изменения c_k и a_k ,

определяющего поглощение в рабочем объеме с учетом паразитного кипения /кавитации/ на поверхности излучателей. Если считать, что $\rho_k \approx \rho$, то в случае паразитного кипения на поверхности излучателей

$$P_m \approx \nu U_m \left[1 + \frac{c}{c_k} \frac{a_k a}{2} (1/\eta_{ам} - 1) \right]^{-1}. \quad /5/$$

Для применяемых нами излучателей в жидком водороде, согласно данным /12/, $\nu \approx 0,003 \text{ бар/в}$. Воспользовавшись формулой /3/, находим, что в рассматриваемой жидководородной УЗПК при отсутствии кавитации удастся реализовать $P_m = 3 \text{ бар}$ при $U_m = 1 \text{ кв}$. Однако вследствие кавитации на поверхности излучателей /см. рис. 3/ давление P_m будет существенно ниже, так как в предельном случае при очень развитой кавитации величина c_k может уменьшиться до $c_k \sim 0,3 c$ /11/.

Проявление кавитации состоит в уменьшении давления P_m не только в результате уменьшения входного импеданса излучателя, но и в результате расстройки резонансного размера a , для которого может нарушиться условие кратности длинам волн λ вследствие изменения скорости звука. В этом случае приведенные выше формулы становятся несправедливыми и расчеты значительно усложняются. Следует отметить, что такая расстройка резонансного размера a приводит к "разрушению" поля стоячих волн ультразвука в рабочем объеме УЗПК. Амплитуда давления ультразвука значительно уменьшается и может быть грубо оценена по формуле, аналогичной /2/, где вместо $\eta_{ам}$ необходимо подставлять коэффициент полезного действия излучателей с учетом кавитации η_k .

Полученные в настоящей работе результаты свидетельствуют о возможности создания и практического применения нового трекового детектора ионизирующих частиц - жидководородной ультразвуковой пузырьковой камеры.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить Л.Г.Ткачева и В.Д.Шестакова за ряд полезных дискуссий, а также группу механиков отдела экспериментальной ядерной физики за техническое обслуживание аппаратуры.

Литература

1. R.C.A.Brown, H.J.Hilke, A.H.Rogers. *Nature*, 220, 1177 (1968).
2. В.А.Акуличев, Л.Р.Гаврилов, В.Г.Гребинник, В.А.Жуков, Г.Либман, А.П.Маныч, Л.Д.Розенберг, Ю.И.Рудин, Г.И.Селиванов. Докл. АН СССР, 189, 973/1969/.
3. R.C.A.Brown, G.Harigel, H.J.Hilke. *Nucl. Instr. & Meth.*, 82, 327 (1970).
4. В.А.Акуличев, В.Г.Гребинник, В.А.Жуков, В.А.Красильников, А.П.Маныч, Г.И.Селиванов. ОИЯИ, Р13-6513, Дубна, 1972.
5. R.C.A.Brown, H.J.Hilke, P.D.Jarman. *Nucl. Instr. & Meth.*, 106, 573 (1973).
6. Т.Д.Блохинцева, А.Т.Василенко, В.Г.Гребинник, В.А.Жуков, Г.Либман, Л.Л.Неменов, Г.И.Селиванов. Юань Жун Фан: Приборы и техника эксперимента, №5, 51 /1962/.
7. Л.Г.Ткачев, В.Д.Шестаков. Влияние ультразвука на динамику парового пузырька в жидком водороде, ОИЯИ, Р13-5751, Дубна, 1971.
8. С.Н.Ржевкин. Курс лекций по теории звука. М., МГУ, 1960.
9. В.А.Акуличев, А.М.Копова. Ультразвуковые излучающие системы для криогенных жидкостей. VIII Всесоюзная акустическая конференция. Рефераты докладов. Изд. АН СССР. М., 1973.
10. Л.Бергман. Ультразвук и его применение в науке и технике. ИЛ, М., 1957.
11. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Механика сплошных сред. М., Физматгиз, 1954.
12. *Physical Acoustics* (ed. W.Mason), vol. 1A, N.Y., 1964.
Перевод: Физическая акустика, под ред. У.Мэсона, т. 1А, М., 1966.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 октября 1973 года.