

СЗУУ, 12

А-УУ1

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

3042/2-72

У/12-72

P13 - 6513



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

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ
ТРЕКОВ ИОНИЗИРУЮЩИХ ЧАСТИЦ
В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ
В ЖИДКОВОДОРОДНОЙ ПУЗЫРЬКОВОЙ КАМЕРЕ

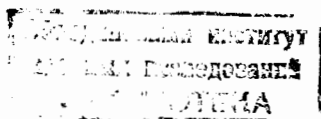
1972

P13 - 6513

В.А.Акуличев*, В.Г.Гребинник, В.А.Жуков,
В.А.Красильников*, А.П.Маныч, Г.И.Селиванов

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ
ТРЕКОВ ИОНИЗИРУЮЩИХ ЧАСТИЦ
В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ
В ЖИДКОВОДОРОДНОЙ ПУЗЫРЬКОВОЙ КАМЕРЕ

* Акустический институт АН СССР, Москва.



Создание жидководородных ультразвуковых пузырьковых камер связано с решением сложных технических задач, обусловленных тем, что для формирования треков ионизирующих частиц в жидком водороде необходимо реализовать большие амплитуды давления ультразвукового поля при сравнительно малом волновом сопротивлении рабочей среды. Это приводит к необходимости излучения в жидком водороде ультразвука достаточно большой интенсивности (~ 50 Вт/см²).

Для жидкого гелия, характеризующегося более выгодными термодинамическими условиями формирования треков, задача существенно упрощается. В этом случае требуются легко достижимые интенсивности ультразвука ~ 1 Вт/см². Поэтому гелиевую ультразвуковую пузырьковую камеру удалось легко построить применяя в качестве ультразвуковых излучателей простые плоскостержневые элементы из пьезокерамики PZT -4 (цирконат - титанат свинца) /1/.

Очевидно, что на данном этапе создание жидководородной ультразвуковой пузырьковой камеры вполне возможно при применении ультразвуковых фокусирующих систем, позволяющих возбуждать достаточно большие интенсивности ультразвука в некоторой области рабочего объема камеры. Такой путь был намечен в работе /2/, в которой впервые в жидководородной пузырьковой камере удалось наблюдать треки ионизи-

рующих частиц, применив ультразвуковой излучатель в комбинации с механической расширительной системой. Этот путь может оказаться плодотворным в тех случаях, когда ультразвуковая пузырьковая камера используется в качестве быстродействующей мишени-детектора и к ней не предъявляются жесткие требования в отношении однородности треков и эффективного использования всего рабочего объема.

Однако получение высококачественных однородных треков, по-видимому, возможно только в поле плоских ультразвуковых волн достаточно высокой частоты. Наиболее простой способ создания таких полей основывается на использовании плоскостержневых излучателей.

Поскольку эффективность таких излучателей в условиях глубокого холода недостаточно изучена, нами были проведены испытания нескольких типов простых пьезокерамических элементов из цирконата-титаната свинца (ЦТС) при температурах жидкого азота и жидкого водорода. Оказалось, что вследствие механических напряжений, обусловленных пьезоэффектом и выделением тепла в керамике, полуволновые пьезокерамические элементы обычно разрушаются при значениях интенсивности ультразвукового поля существенно меньшей той, которая требуется для создания необходимости перепада давления.

Аналогичный результат был также получен в работе /3/, где использовалась пьезокерамика типа *PZT -4*.

В связи с указанными трудностями мы рассмотрели возможность использования новых в конструктивном отношении ультразвуковых излучателей. При этом был максимально использован опыт разработки составных ультразвуковых систем, предназначенных для работы в обычных жидкостях /4/.

В настоящей работе представлены результаты исследований формирования треков ионизирующих частиц в жидководородной пузырьковой камере при воздействии ультразвукового поля, возбуждаемого составными

ультразвуковыми излучателями, специально разработанными для использования в криогенных жидкостях. Исследования, как и в работе /2/, проводились с помощью 25-сантиметровой жидководородной пузырьковой камеры /5/, которая находилась при температуре 27°К, что соответствовало равновесному давлению паров $P_n = 4,8$ ат. Статическое давление в камере P_0' составляло 5,2 ат.

Блок-схема экспериментальной аппаратуры представлена на рис. 1. Расстояние между излучающими поверхностями предварительно устанавливалось при сборке равным 58 мм, что соответствовало двум длинам волн ультразвука на частоте резонанса 30 кгц при температуре 27°К. При этом в рабочем объеме пузырьковой камеры между излучателями

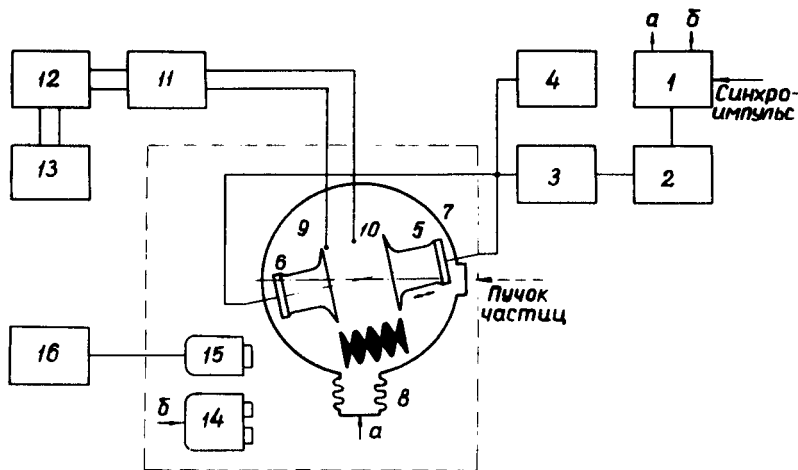


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной аппаратуры. 1 - блок синхронизации; 2 - задающий генератор серии колебаний; 3 - усилитель мощности; 4 - импульсный вольтметр; 5 и 6 - ультразвуковые излучатели; 7 - жидководородная пузырьковая камера; 8 - механическая расширительная система; 9 и 10 - миниатюрные ультразвуковые приемники; 11 - усилители; 12 - осциллограф; 13 - ламповый вольтметр; 14 - стереофотоаппарат; 15 - передающая телекамера; 16 - приемная телекамера.

образовывалось пять зон чувствительности (см. рис. 1). Точная установка излучателей производилась дистанционно в рабочем состоянии с помощью механического устройства, которое давало возможность в пределах ± 10 мм смещать один из излучателей в осевом направлении. Визуальное наблюдение за поведением жидкости в режиме непрерывного излучения ультразвука на пониженной мощности позволяло весьма точно выбирать оптимальное положение излучателей, при котором между ними устанавливалась стоячая волна.

Конструктивное исполнение излучателей ясно из рис. 2. В качестве пьезокерамических элементов применялись шайбы из керамики ЦТС диаметром 50 мм и толщиной 5 мм. В выбранном варианте конструкции они располагались между плоскими поверхностями металлических шайб и внешнего цилиндрического корпуса. Для увеличения механической прочности излучателей и повышения их долговечности пьезокерамические элементы сжимались с помощью гидравлического пресса до напряжения 200 кг/см^2 , которое в дальнейшем фиксировалось резьбовой гайкой.

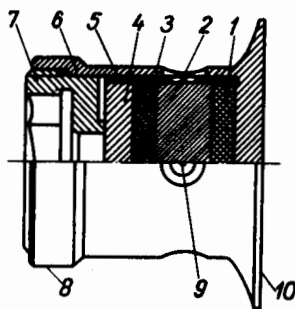


Рис. 2. Составной ультразвуковой излучатель. 1 и 3 - пьезокерамические элементы; 2 и 4 - металлические шайбы; 5 - тефлоновый изолятор; 6 - корпус излучателя; 7 - армирующая гайка; 8 - узел крепления; 9 - клемма; 10 - излучающая поверхность.

Применяя в конструкциях излучателей металлические элементы с температурными коэффициентами расширения, близкими к температурным коэффициентам пьезокерамики (титановые сплавы), удалось добиться сохранения армирующего напряжения при низких температурах. Для обеспечения акустического контакта между пьезокерамикой и металлом были помещены прокладки из индия.

Излучающая стенка в краевой области имела переменное сечение, что позволяло увеличить излучающую поверхность и таким образом повысить к.п.д. излучателей. Кроме того, некоторое увеличение к.п.д. достигалось вынесением пьезокерамических элементов из центральной части излучателя, где максимальны деформации при колебаниях и максимальны связанные с этим внутренние потери /6/.

Общий вид ультразвуковой системы, смонтированной на фланце жидководородной пузырьковой камеры, показан на рис. 3.

Экспериментальные исследования формирования треков ионизирующих частиц при воздействии ультразвукового поля проводились, как и ранее /2/, следующим образом. В рабочем объеме камеры, первоначально доведенной до оптимального режима чувствительности, постепенно уменьшался перегрев, вызванный действием механической расширительной системы, и достигался такой режим, когда чувствительность камеры к ионизирующему излучению практически полностью исчезала. При достижении такого режима чувствительность камеры в дальнейшем восстанавливалась введением импульсного ультразвукового поля. Для инициирования треков ионизирующих частиц использовался пучок π^- -мезонов с энергией 340 Мэв от синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Момент прохождения частиц через рабочий объем камеры строго синхронизировался с включением механической расширительной системы, а также с излучением ультразвукового импульса и включением импульсного освещения камеры. Треки ионизирующих частиц в пузырьковой камере фотографировались стереофотоаппаратом, а их визуальное наблюдение осуществлялось с помощью телевизионной установки.

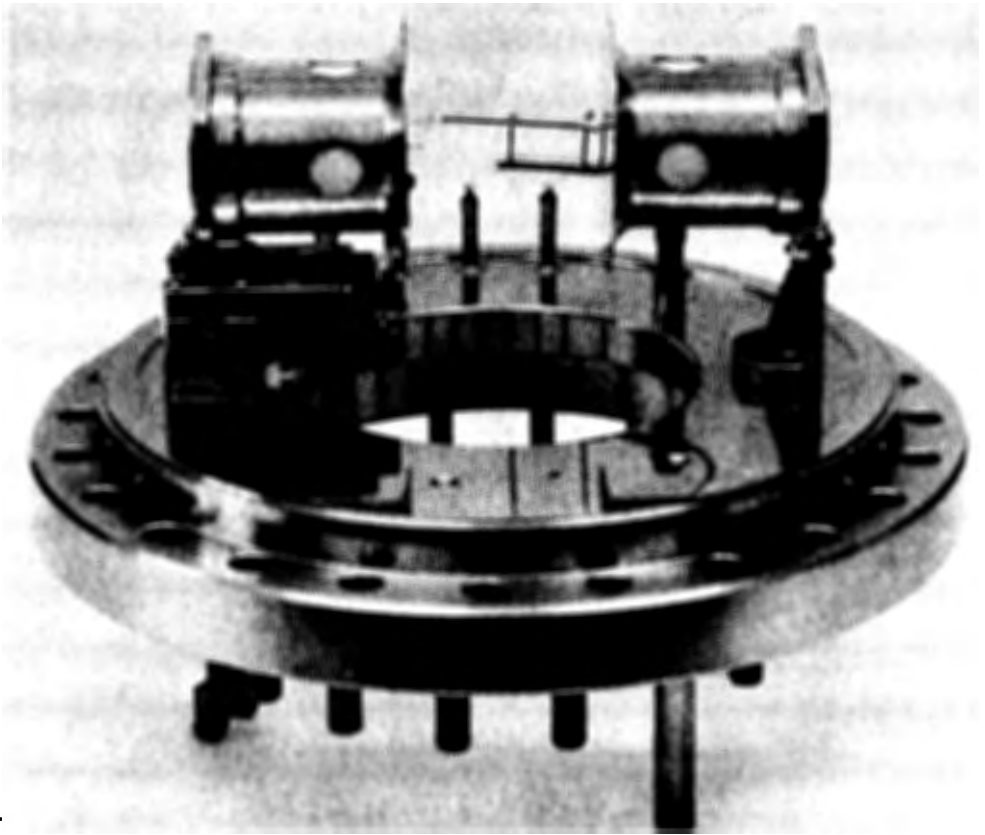


Рис. 3. Ультразвуковая система в собранном виде на фланце пузырьковой камеры.

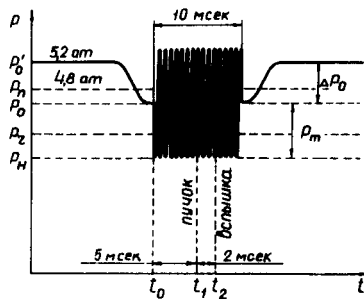


Рис. 4. Диаграмма изменения давления со временем в рабочем объеме пузырьковой камеры при совместном действии ультразвука и механической системы расширения.

На рис. 4 показано изменение давления в пузырьковой камере во времени, вызванное расширительным устройством и ультразвуковыми излучателями. На рисунке отмечены моменты начала возбуждения импульса ультразвука t_0 , ввода пучка ионизирующих частиц от ускорителя t_1 и фотосъемки треков t_2 . Ультразвуковой импульс длительностью 10 мсек подавался на излучатели приблизительно за 5 мсек до прихода ионизирующих частиц. Длительность импульса пучка частиц от ускорителя составляла $\sim 0,3$ мсек и примерно равнялась десяти периодам ультразвукового поля на частоте 30 кгц. Интервал времени $t_2 - t_1$ между фотосъемкой и вводом пучка частиц составлял ~ 2 мсек, что примерно равнялось 60 периодам ультразвукового поля. На рисунке введены следующие обозначения: P_0' -исходное статическое давление в рабочем объеме пузырьковой камеры; P_0 -нижний уровень давления, создаваемого расширительной системой; P_n -давление насыщенных паров жидкого водорода; $P_{\text{ч}}$ -давление пороговой чувствительности к ионизирующему излучению; P_m -амплитуда давления ультразвукового поля; P_H -нижнее давление, реализуемое в пузырьковой камере.

Следует отметить, что треки в ультразвуковой камере вырастают до видимого размера и регистрируются только в тех участках, где в момент прохождения ионизирующих частиц давление ультразвуковой волны отрицательно и не превышает давления $P_{\text{ч}}$. Поэтому для каждой проходящей через рабочую область частицы инициированный ею трек является в пространстве разрывным, причем расстояние между отдельными участками трека равно длине ультразвуковой волны.

На рис. 5 показана типичная фотография треков в жидководородной пузырьковой камере, полученная при совместном действии ультразвука и расширительной системы обычного типа. Последняя обеспечивала степень расширения жидкости $\sim 0,3\%$, что соответствовало понижению статического давления в камере примерно на 0,7 ат. Величина напряже-

ния на излучателях равнялась 1,0 кв. При этом амплитуда давления ультразвукового поля P_m составляла ~1,5 ат. На фотографии для наглядности контуры излучателей на темном поле выделены белыми линиями.

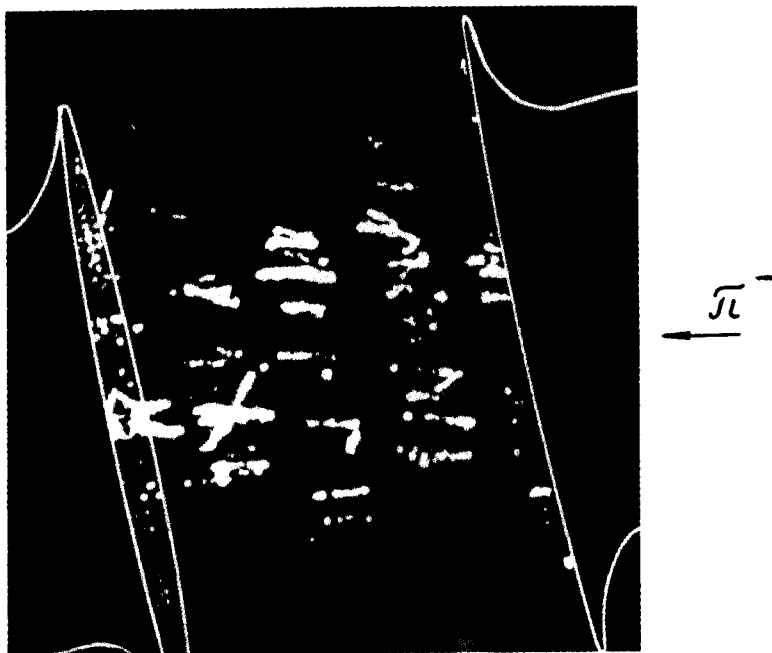
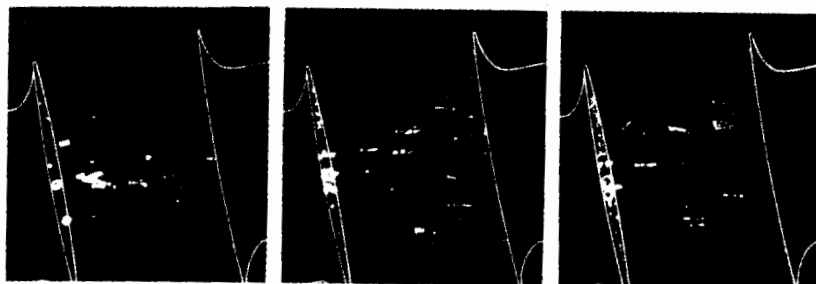


Рис. 5. Треки отрицательных пионов с энергией 340 Мэв в ультразвуковом поле стоячих волн в жидководородной пузырьковой камере ($\Delta V/V = 3 \cdot 10^{-3}$; $P_0 = 4,5$ ат; $U = 1,0$ кв; $P_m = 1,5$ ат).

Чтобы исследовать пороговые условия образования треков в ультразвуковом поле степень расширения жидкости за счет действия расширительной системы постепенно уменьшалась, и при каждом фиксированном ее значении вырывалось напряжение на ультразвуковых излучателях. На рис. 6 и 7 представлены фотографии треков, полученные при различных значениях напряжения на излучателях и при величинах исходных степеней расширения, соответственно равных 0,24 и 0,18%.

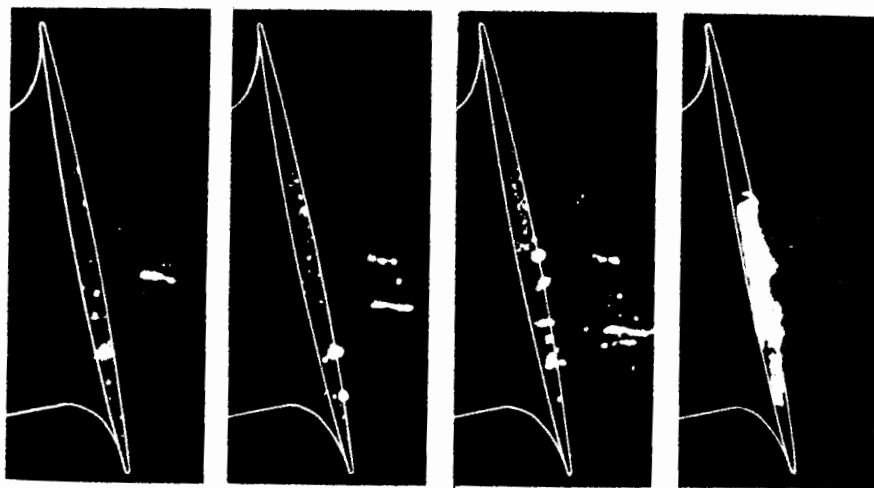


$U=1\text{кВ}$

$U=1,2\text{кВ}$

$U=1,4\text{кВ}$

Рис. 6. Треки отрицательных пионов в ультразвуковом поле в жидководородной камере при различных электрических напряжениях на ультразвуковых излучателях ($\Delta V / V = 2,4 \cdot 10^{-3}$; $P_0 = 4,65 \text{ ат}$).



$U=1,4\text{кВ}$

$U=1,5\text{кВ}$

$U=1,6\text{кВ}$

$U=2\text{кВ}$

Рис. 7. Паразитное кипение (кавитация) на поверхности ультразвуковых излучателей в жидком водороде при различных напряжениях ($\Delta V / V = 1,8 \cdot 10^{-3}$; $P_0 = 4,8 \text{ ат}$).

Следует отметить, что в последнем случае действие механической расширительной системы лишь компенсировало избыточное давление пережатия. Таким образом, в момент включения ультразвука давление в камере было равно давлению насыщенного пара. Тем не менее на фотографиях при некоторых значениях напряжения на излучателях отчетливо видны треки частиц. Характерно также, что увеличение подводимой электрической мощности приводит к развитию паразитного кипения (кавитации) на поверхности излучателей, и, в конце концов, к полному по давлению треков частиц (правая фотография на рис. 7).

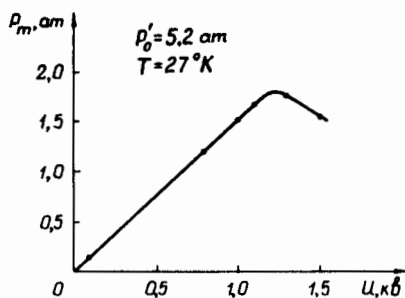


Рис. 8. Зависимость амплитуды давления ультразвукового поля от напряжения на излучателях.

Известно [7], что в жидкостях кавитация является причиной падения сопротивления излучения, уменьшения к.п.д. излучателей и понижения давления ультразвукового поля. На рис. 8 представлена зависимость амплитуды давления в пучности ультразвуковой волны от величины электрического напряжения. Измерения проводились миниатюрным пьезокерамическим приемником 10 (см. рис. 1), помещенным посередине между излучателями. Можно видеть, что начиная с некоторого значения напряжения линейная зависимость между давлением и напряжением нарушается. Максимальная величина амплитуды давления, равная примерно 1,75 ат,

наблюдалась при $U = 1,2$ кв. Дальнейший рост напряжения приводил к уменьшению давления ультразвукового поля.

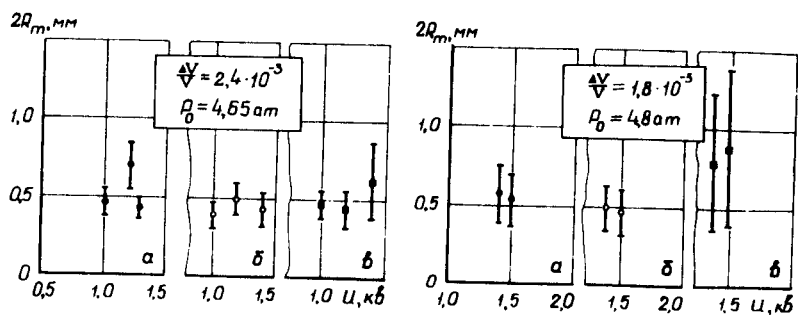


Рис. 9. Размеры пузырьков в жидком водороде при различных напряжениях на излучателях. а - сплошные треки, б - одиночные пузырьки треков, в - одиночные полости паразитного кипения (кавитации).

Более полное представление о влиянии кавитации на условия формирования треков частиц в ультразвуковом поле дают измерения поперечных размеров сплошных треков, диаметров одиночных пузырьков, составляющих трек, а также кавитационных полостей на поверхности излучателей. Измерения проводились на пленке с помощью микроскопа. Зависимость указанных выше величин от напряжения на излучателях представлена на рис. 9. При обработке данных предполагалось, что измеряемые размеры изображений пузырьков и треков соответствуют максимальному их значению при пульсациях пузырьков в ультразвуковом поле. Указанный на рисунке разброс максимальных диаметров ($2R_m$) может быть обусловлен как различными начальными условиями роста пузырьков, связанными с приходом частиц пучка в моменты различных фаз ультразвукового поля, так и различным числом циклов роста пузырьков из-за соизмеримости длительности пучка частиц и интервала времени между фотосъемкой и прохождением частиц в камере. Так как из-за опти-

ческих эффектов изображение пузырьков на пленке не дает правильного представления об его истинном размере, то оценка размеров пузырьков производилась путем сравнения наблюдаемых пузырьков с изображениями, полученными при фотографировании в тех же условиях специального калиброванного пузырькового трека /8/.

Результаты, представленные на рис. 9, по-видимому, указывают на то, что с повышением электрического напряжения размеры сплошных треков и одиночных пузырьковых треков растут только до определенного предела, в то время как размеры пузырьков паразитного кипения (кавитации) на поверхности излучателей продолжают увеличиваться.

По данным, представленным на рис. 8 и 9, можно построить зависимость размеров сплошных треков и одиночных пузырьковых треков ионизирующих частиц от давления ультразвукового поля и от давления в камере (рис. 10). Полученные результаты позволяют количественно охарактеризовать динамику треков в ультразвуковом поле в жидком водороде. Это представляет определенный интерес для дальнейшего развития теоретических /9,10/ и практических разработок жидководородных ультразвуковых пузырьковых камер.

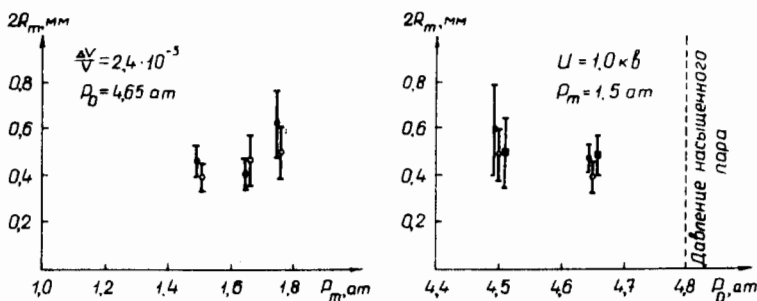


Рис. 10. Размеры пузырьков в жидком водороде при различных давлениях ультразвукового поля P_m и различных давлениях в камере P_0 .

● - сплошные треки, ○ - одиночные пузырьки треков, ■ - одиночные полости паразитного кипения (кавитации) на поверхности излучателей.

В заключение авторы приносят благодарность Л.Г. Ткачеву, А.М. Коповой, Л.О. Макарову за полезные обсуждения ряда вопросов, Е.В. Гераскину за помощь в проведении эксперимента на ускорителе, а также коллективу механиков ОЭЯФ-2 за техническое обслуживание жидководородной пузырьковой камеры.

Л и т е р а т у р а

1. R.C.A. Brown, H.J. Nilke, 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. Nilke. *Nucl. Instr. and Meth.*, 82, 327 (1970).
4. *Physical Acoustics* (ed. W. Mason), vol. 1A N.-Y., 1964. (Имеется перевод: физическая акустика, под ред. У. Мэсона, т. 1A, изд-во "Мир", М., 1966).
5. 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).
6. L.O. Makarov. *Seventh Interns. Congress on Acoustics*, Rep. 23E6, Budapest, 1971.
7. Мощные ультразвуковые поля (под ред. Л.Д. Розенберга). Изд-во "Наука" М., 1968.
8. В.М. Горбунков. Авторск. свидетельство. СССР № 178991. Бюллетень изобретений № 24, 1965.
9. В.А. Акуличев, В.Н. Алексеев, К.А. Наугольных, Л.Г. Ткачев, В.Д. Шестаков. ОИЯИ, P13-5327, Дубна, 1970.
10. Л.Г. Ткачев, В.Д. Шестаков. ОИЯИ, P13-5751, Дубна, 1971.

Рукопись поступила в издательский отдел
12 июня 1972 года.