

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКНОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ**ПУЗЫРЬКОВЫЕ КАМЕРЫ***Е. В. Кузнецов*

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	361
I. Физические основы работы пузырьковых камер	363
1. Перегретые жидкости	363
2. Применение перегретых жидкостей для детектирования ионизирующих частиц	364
II. Конструкции пузырьковых камер	365
1. Собственно камера и расширительное устройство	366
2. Термостатирующие устройства	368
3. Фотоаппарат и осветительная система	369
4. Обработка снимков	370
5. Водородные камеры	370
III. Рабочие жидкости	373
1. Органические жидкости	373
2. Неорганические жидкости	376
3. Пересыщенные газовые растворы	378
4. Смеси жидкостей	379
IV. Рабочие характеристики пузырьковых камер	379
1. Выбор температуры и давления	379
2. Коэффициент расширения	380
3. Чувствительность	380
4. Время чувствительности и скорость роста пузырьков	380
5. Длительность рабочего цикла и эффективность	381
6. Взаимосвязь рабочих параметров	383
V. Измерение скорости частиц с помощью пузырьковой камеры	385
Цитированная литература	388

ВВЕДЕНИЕ

Трековые приборы, сыгравшие большую роль в развитии физики, значительно отличаются от других детекторов частиц. Они дают большое количество информации об отдельных ядерных процессах и поэтому могут быть использованы с источниками частиц слабой интенсивности. Полученные с их помощью данные отличаются чрезвычайной наглядностью.

Быстрое развитие техники ускорителей элементарных частиц привело к тому, что существовавшие до 1952 г. трековые приборы—камера Вильсона, диффузионная камера и ядерные эмульсии—не могли уже в достаточной степени удовлетворить требованиям физики элементарных частиц высоких энергий. Основным недостатком первых двух приборов является слишком малая тормозная способность рабочего вещества; недостаток метода фотоэмульсий заключается в невозможности построения эмуль-

сионных камер больших размеров, а также в чрезвычайной трудности процесса обработки следов частиц в фотоэмульсиях.

Назревшая задача создания трекового прибора с высокой плотностью рабочего вещества и значительными геометрическими размерами была успешно разрешена Глэзером в 1952 г.^{1,2} Новый прибор, получивший название пузырьковой камеры, представляет собой, вообще говоря, сосуд, наполненный какой-либо прозрачной перегретой жидкостью. Ионизирующая частица, проходящая через камеру, вызывает резкое вскипание жидкости в узкой области вдоль своего следа и, таким образом, ее путь отмечается цепочкой пузырьков пара.

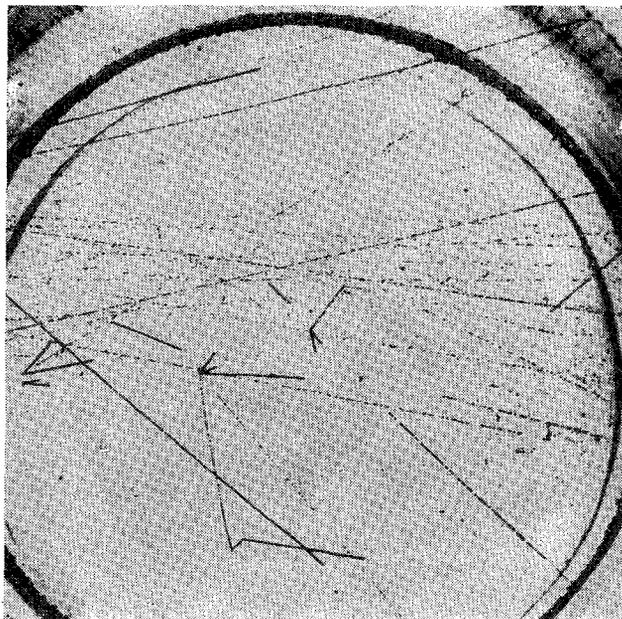


Рис. 1. Следы быстрых частиц в пузырьковой камере.

Первая пузырьковая камера была наполнена диэтиловым эфиром и имела небольшой размер—несколько см³. В последующие годы во многих физических лабораториях мира были построены пузырьковые камеры, в которых использовались разнообразные рабочие жидкости. В 1953 г. появились сведения о чувствительности перегретого жидкого водорода к ионизирующим излучениям³, а в 1954 г. были получены первые фотографии следов частиц в водородной пузырьковой камере⁴. Следы частиц были сфотографированы также в гелии, этилене, ксеноне, пропане, н- и изопентане, бутане, фреонах Ф-13 и Ф-12 и других жидкостях. Кроме того, было показано, что двуокись серы, жидкий азот, бензол, этиловый и метиловый спирты также чувствительны к излучениям⁵.

Если в первые два-три года своего развития пузырьковая камера сама была объектом исследований, то в настоящее время она стала одним из основных приборов физики частиц высоких энергий. Пузырьковые камеры с успехом применялись для изучения взаимодействий K^- с протонами, расщепения π^- на водороде, реакций типа $\pi^- + p \rightarrow \Sigma^- + K^+$ и т. д.

Быстрое развитие методики пузырьковых камер свидетельствует о значительных преимуществах этого метода перед другими трековыми мето-

дами. При плотности вещества, сравнимой с плотностью фотоэмульсий, пузырьковая камера по своим размерам и по легкости обработки треков близка к камере Вильсона. Благодаря большой скорости роста пузырьков в ней полностью отсутствуют искажения из-за конвекции. Длительность рабочего цикла пузырьковой камеры составляет, в среднем, 5–10 сек., т. е. в несколько раз меньше, чем длительность цикла камеры Вильсона.

Одна из разновидностей пузырьковых камер—водородная камера—представляет собой идеальный прибор для изучения взаимодействий быстрых частиц с протонами. Пузырьковая камера допускает высокие загрузки в противоположность диффузионной камере высокого давления. Время жизни зародышей пузырьков в пузырьковой камере мало, в связи с чем камера обладает очень короткой «памятью» (в ней не развиваются треки частиц, прошедших через камеру до того, как жидкость была перегрета). В условиях работы с пульсирующими ускорителями отсутствие «памяти» резко снижает фон. Снимок, сделанный с помощью пузырьковой камеры, всегда выгодно отличается от вильсоновского снимка отсутствием фона и искажений из-за конвекции. На рис. 1 приведена типичная фотография следов быстрых частиц в пузырьковой камере.

Недостатком пузырьковой камеры является невозможность осуществления в ней управляемого режима и малая, по сравнению с фотоэмульсиями, геометрическая разрешающая способность, так как число пузырьков на единицу длины следа относительно невелико.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ПУЗЫРЬКОВЫХ КАМЕР

1. Перегретые жидкости

Жидкость в перегретом состоянии представляет собой метастабильную систему. С энергетической точки зрения более выгодно расслоение на две фазы, однако этому препятствует потенциальный барьер, связанный с увеличением свободной поверхности жидкости при закипании.

В самом деле, пусть жидкость находится в состоянии, характеризуемом температурой T , гидростатическим давлением p и давлением насыщенных паров над плоской поверхностью жидкости p_{∞} ; пусть $p_{\infty} > p$, т. е. жидкость перегрета. Если при этом в жидкости возникнет каким-либо образом пузырек пара, то его дальнейшая судьба существенно зависит от его радиуса, так как, кроме гидростатического давления, со стороны жидкости на него действуют еще силы поверхностного натяжения. Добавочное давление, обусловленное поверхностным натяжением, определяется формулой

$$p_{\text{пов}} = \frac{1}{4\pi r^2} \frac{dU_{\text{пов}}}{dr} = \frac{2\sigma}{r}, \quad (1)$$

где σ —коэффициент поверхностного натяжения. При малых значениях r величина $p_{\text{пов}}$ может быть очень велика и пузырек будет сокращаться, «захлопываться», при r , больших некоторого $r_{\text{кр}}$,—расти. Из условия равновесия пузырька, заключающегося в равенстве давления насыщенных паров сумме гидростатического давления и давления, обусловленного поверхностным натяжением, можно определить этот критический радиус:

$$r_{\text{кр}} = \frac{2\sigma}{p_{\infty} - p}. \quad (2)$$

Зародышевый пузырек с $r > r_{\text{кр}}$ может быть создан либо за счет тепловых флуктуаций, либо, например, за счет энергии ионизирующей частицы. Вероятность флуктуационного образования зародышевых пузырьков в

жидкости пропорциональна ⁶

$$W \sim \exp \left[-\frac{16\pi\sigma^3}{3kT(p_\infty - p)^2} \right]. \quad (3)$$

При небольших перегревах, т. е. малых для данной температуры значениях $(p_\infty - p)$, вероятность вскипания чистой жидкости становится очень малой. В этом случае кипение начинается на деталях камеры (прокладках, мембранах, стенках) или на следах ионизирующих частиц.

При больших перегревах становится заметной вероятность флуктуационного образования зародышевых пузырьков. В этом случае в жидкости выделяется множество маленьких пузырьков пара, образуется «туман», жидкость вскипает сразу по всему объему.

2. Применение перегретых жидкостей для детектирования ионизирующих частиц

Роль ионизирующей частицы, проходящей через пузырьковую камеру, сводится к образованию цепочки зародышевых пузырьков вдоль своего следа, на что затрачивается относительно небольшое количество энергии. Дальнейшее развитие трека происходит уже за счет энергии перегретой жидкости.

Механизм образования зародышевых пузырьков до сих пор еще не ясен. Существуют два варианта теории этого явления.

В первом варианте процесс возникновения зародышевых пузырьков представляется следующим образом. Ионизирующая частица создает несколько одноименных ионов внутри паровой полости, образованной за счет тепловых флуктуаций. Ионы «салятся» на поверхность полости и остаются на ней, удерживаемые некими «локальными силами»⁷. Благодаря силам электростатического отталкивания ионов полость растягивается и, таким образом, создается зародышевый пузырек. Этого варианта придерживался вначале Глэзер, а затем он был развит Бертанзой, Мартелли и Закутти⁸. Основное возражение против него заключается в том, что неизвестны никакие «локальные удерживающие силы», благодаря которым ионы могли бы тянуть за собой поверхность паровой полости. Тем не менее теория, основанная на электростатической модели, дает согласные с опытом значения рабочих температур и давлений.

Согласно второму варианту зародышевые пузырьки образуются благодаря дополнительному местному перегреву, созданному прямой передачей кинетической энергии от ионов к близлежащим молекулам. Значительным аргументом в пользу этого варианта является нечувствительность перегретого чистого ксенона к ионизирующим частицам (см. раздел III).

Неудача всех попыток осуществления управляемого режима в пузырьковой камере означает, что условия, благоприятные для образования зародышевых пузырьков, могут поддерживаться только в течение очень короткого промежутка времени после прохождения частицы. Этот факт легко объясним в рамках теплового варианта, так как время тепловой релаксации для размеров порядка критического радиуса составляет величину менее 10^{-8} сек.

Некоторые качественные стороны процесса образования зародышевых пузырьков могут быть оценены из энергетических соображений. Вычислим минимальную энергию, необходимую для создания зародышевого пузырька⁹:

$$E_{кр} = \frac{32}{3} \frac{H\pi}{kT} \frac{p_\infty \sigma^3}{(p_\infty - p)^3} + \frac{16\pi\sigma^3}{(p_\infty - p)^2} + \frac{\sqrt{32}}{3} \frac{\pi p \sigma^3}{(p_\infty - p)^3}. \quad (4)$$

Здесь H — теплота испарения, T — температура в градусах Кельвина. Первый член описывает энергию, идущую на испарение жидкости внутрь пузырька, второй — энергию, затраченную на создание поверхности пузырька и третий — энергию расширения до радиуса $r_{кр}$.

Из формулы (4) видно, что величина $E_{кр}$, определяющая чувствительность камеры, резко зависит от коэффициента поверхностного натяжения жидкости и перепада давлений ($p_{\infty} - p$). Для снижения величины $E_{кр}$ выгодно работать вблизи критической температуры, так как величины σ и H уменьшаются до нуля при приближении к критической точке (вблизи $T_{кр} \sigma \sim (T_{кр} - T)^{3/2}$ и $H \sim (T_{кр} - T)^{1/2}$). Кроме того, вблизи критической точки можно осуществить большие перепады давлений, не прибегая к отрицательным давлениям.

Рабочая точка пузырьковой камеры не может, однако, быть выбрана сколь угодно близко к критической точке. Это связано с тем, что при повышении температуры рабочая область давлений, заключенная между значением $p_{\infty} - p$, вызывающим туман, и значением, при котором появляется чувствительность к ионизирующим частицам, становится очень узкой и работа камеры делается неустойчивой.

Энергия, необходимая для создания пузырька критического размера, должна быть выделена на расстояниях порядка критического радиуса, т. е. $10^{-5} - 10^{-6}$ см. Такие условия создаются на концах пробегах δ -электронов, образуемых ионизирующими частицами. Электроны, имеющие энергию около 200 эв, теряют всю энергию на длине менее 10^{-5} см¹⁰ (в жидком пропане), поэтому можно думать, что основную роль в создании пузырьков играют δ -электроны с энергией больше $100 \div 200$ эв. Число таких δ -электронов пропорционально Z^2/β^2 , где Z — заряд частицы, а β — скорость частицы в единицах скорости света. В связи с этим следует ожидать, что зависимость плотности следа нерелятивистской частицы от ее скорости будет иметь вид¹⁰:

$$g = g_0 \frac{Z^2}{\beta^2}. \quad (5)$$

Здесь g_0 — некоторая постоянная, зависящая от сорта используемой жидкости и выбора режима работы камеры.

II. КОНСТРУКЦИИ ПУЗЫРЬКОВЫХ КАМЕР

Пузырьковая камера представляет собой довольно громоздкое устройство, по сложности равное примерно камере Вильсона высокого давления. Кроме объема, заполненного рабочей жидкостью (т. е. собственно камеры), в состав установки входят: расширительное устройство, термостатирующая система, осветительная система, фотоаппарат и схема управления.

Пузырьковые камеры употребляются обычно при работе на пульсирующих ускорителях. Связь работы отдельных узлов установки при этом выглядит следующим образом. Температура камеры все время поддерживается постоянной. Начальное давление имеет величину несколько большую p_{∞} . За некоторое время до прохождения частиц через камеру срабатывает расширительное устройство и давление в камере быстро падает до уровня, лежащего значительно ниже давления насыщенных паров жидкости при данной температуре. Таким образом, жидкость оказывается перегретой, и камера становится чувствительной к ионизирующим излучениям. В этот момент через камеру пропускается пучок частиц. Через некоторое время после пролета частиц поджигаются осветительные лампы и производится фотографирование треков. Затем расширительное устройство поднимает давление в камере до исходного значения, паровая фаза

конденсируется и камера вновь готова к работе. Сброс давления, поджог ламп, продергивание пленки в фотоаппарате и повышение давления производится по сигналам схемы управления.

Ниже рассматривается устройство отдельных блоков, кроме схемы управления, вид которой зависит от конкретной физической задачи. Отдельно обсуждаются конструкции водородных камер.

1. Собственно камера и расширительное устройство

По конструктивному выполнению камеры делятся на два класса, значительно различающихся своими временными характеристиками.

Камеры, выполненные целиком из стекла, расширительное устройство которых вынесено в холодную зону, принято называть «чистыми» камерами. Холодной зоной обозначают ту часть камеры, в которой температура жидкости лежит ниже температуры кипения при $p = p_n$, где p_n (нижнее давление) — уровень, до которого сбрасывается давление в камере (в предыдущем разделе это давление называлось просто p). К этому классу относится первая камера Глэзера, поэтому их иногда называют еще камерами глэзеровского типа.

Ко второму классу относятся металлические камеры, называемые иногда камерами «грязного» типа. В этих камерах перегретая жидкость непосредственно соприкасается с прокладками между корпусом и стеклом, с самим корпусом, а в некоторых конструкциях и с мембраной расширительного устройства.

Основное преимущество металлических камер перед стеклянными заключается в возможности изготовления камер большого размера, до нескольких десятков литров¹¹, в то время, как для чистых камер величина 500 см³ является, по-видимому, пределом¹².

Чистые камеры обычно изготавливаются из пирекса, хорошо переносящего резкие изменения температуры. Они представляют собой цилиндрические или прямоугольные сосуды с длинным горлышком, через которое производится сброс давления. Вдоль горлышка осуществляется необходимый перепад температуры, от температуры камеры до температуры расширителя. В настоящее время чистые камеры применяются только для методических разработок (опробование новых жидкостей, исследование режимов работы).

Чтобы дать представление об устройстве и работе металлических камер, на рис. 2 приведена схема одной из лучших камер этого типа¹⁰. Объем A наполнен рабочей жидкостью. Объем B , заполненный водой, через отверстия в уплотнительном кольце 3 соединяется с электромагнитным выпускным клапаном 4 , регулятором объема паровой фазы 5 и емкостным манометром 6 . Рабочий объем камеры отделен от объема B фторопластовой мембраной 7 . По каналам между фланцами, прижимающими стекла, и корпусом камеры протекает вода из термостата для нагрева камеры.

Когда внешнее давление не подано (открыт клапан 4), мембрана 7 находится в среднем положении, а резиновые мембраны 8 и 9 прижаты к соответствующим решеткам. Коэффициент расширения можно менять при помощи регулятора 5 , представляющего собой поршень с резиновой мембраной. Уровень сброса давления задается давлением газа в объеме B .

Камера работает следующим образом. Через стабилизатор давления, не показанный на рисунке, и через впускной электромагнитный клапан 10 к резиновой мембране 9 подается какой-либо газ под высоким давлением. Через воду это давление передается к мембранам 7 и 8 , причем, мембрана 8 отходит к решетке, а мембрана 7 поджимает рабочую жидкость. Паровая

фаза полностью конденсируется, после чего камера готова к расширению. За некоторое время до прохождения частиц через камеру, открывается выхлопной клапан 4. Это время выбирается таким, чтобы к моменту пролета частиц через камеру давление успело стать равным давлению p_H газа в объеме B . Давление остается равным p_H до тех пор, пока в результате кипения жидкости на прокладках мембрана 8 не будет прижата к решетке. Все это время камера чувствительна к ионизирующим частицам. Длительность времени чувствительности регулируется с помощью изменения коэффициента расширения.

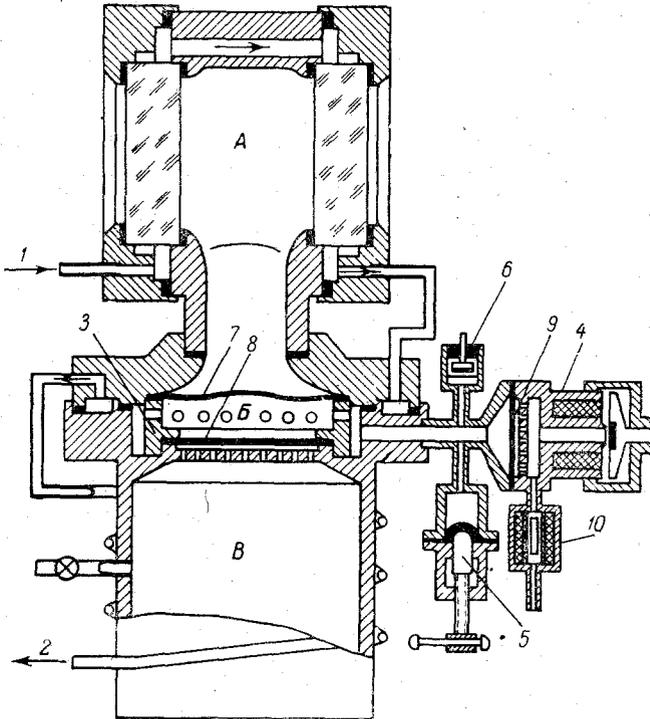


Рис. 2. Металлическая пузырьковая камера.

Метод сброса давления до регулируемого уровня, который впервые был применен в работе ¹³, очень удобен для быстрой регулировки чувствительности и для выбора оптимального режима. Применение его в описанной установке обеспечило рекордное для металлических камер время чувствительности—40 мсек. Камеры такого типа называются камерами с ограничением по давлению.

Камеры, в которых мембрана, поджимающая рабочую жидкость, при сбросе давления ложится на опорную решетку, и в которой, следовательно, величина p_H определяется коэффициентом расширения, называются камерами с ограничением по объему. Эти камеры имеют, как правило малое время чувствительности (3 ÷ 5 мсек).

Сжатие и расширение жидкости в большинстве камер производится с помощью мембран, как в вышеописанной конструкции, однако довольно часто для этой цели употребляются также поршневые или сильфонные устройства.

Внутри камеры могут быть помещены металлические пластины для расширения диапазона энергий частиц, пробеги которых целиком укладываются в камере ¹⁴.

Давление в камере контролируется, как правило, с помощью емкостного манометра, позволяющего осциллографировать изменения давления в камере во время рабочего цикла *). Манометр помещается в расширенном устройстве или располагается в самой камере так, что уточненная в одном месте стенка камеры служит его мембраной.

Корпус камеры обычно вытачивается из одного куска металла, так как места соединений являются источником паразитных закипаний, укорачивающих время чувствительности и закрывающих поле зрения. Внутренняя поверхность корпуса может быть просто чисто обработана резцом, однако в тех случаях, когда необходимо максимальное время чувствительности, она должна быть полирована.

В работе ¹⁰ камера была изготовлена из нержавеющей стали. Известны работающие камеры, сделанные из меди, дюрала, латуни и даже из обычной поделочной стали. Наиболее удобна, по-видимому, нержавеющая сталь. Она химически стойка, немагнитна, обладает сравнительно высокой прочностью, хорошо сохраняет чистую поверхность.

Смотровые окна металлических камер делаются, как правило, из закаленного стекла, которое в несколько раз прочнее обычного оптического стекла **).

В камерах, работающих на фреонах, а также, возможно, и в некоторых других камерах, может быть использовано органическое стекло (плексиглас)²⁸, которое значительно надежнее обычного стекла. Оно хорошо поддается механической обработке, поэтому стекла произвольного размера могут быть изготовлены в любой мастерской. К сожалению, у некоторых сортов органического стекла поверхность трескается под действием высокого давления.

В качестве материала для прокладок между стеклом и корпусом чаще всего используется фторопласт-4 ***). По химической стойкости фторопласт-4 превосходит все другие природные и синтетические материалы и поэтому может употребляться с любой жидкостью. Прокладки могут быть также изготовлены из резины, полиэтилена, мягких металлов—свинца, кадмия, отожженной меди. Если смотровые стекла сделаны из плексигласа, то надобность в прокладках отпадает, так как органическое стекло само достаточно эластично. В этом случае, для лучшего уплотнения, края стекла, прилегающие к металлическому корпусу, можно смазать перед сборкой какой-либо густой жидкостью—бакедитом, клеем БФ-6, смолой «Б» и т. п. Между стеклом и прижимающим фланцем обычно помещается фибровая прокладка.

Материал мембран довольно разнообразен: употребляются мембраны из фторопласта, из фторопласта с резиновой подложкой, из хлорвиниловой пленки, из металлов—нержавеющей стали, фосфористой бронзы, из резины. Наиболее надежны резиновые мембраны, однако они могут быть использованы далеко не со всеми жидкостями.

2. Термостатирующие устройства

Камеры, работающие при температурах выше 100° С, нагреваются электрическими нагревателями. Контроль температуры производится с помощью термисторов или контактных термометров. Точность, обеспечиваемая контактным термометром, по-видимому, вполне достаточна для нормальной работы камеры.

*) Очень простая электронная схема, предназначенная для работы с емкостным датчиком, описана в ¹⁴.

**) Для закалки пригодны стекла марок К-3, К-4, К-5.

***) В американской и английской литературе фторопласт называется тефлоном.

Если рабочая температура камеры лежит в интервале $30-100^{\circ}\text{C}$, то ее удобнее всего нагревать с помощью термостата *). В этом случае регулировка температуры производится в самом термостате.

Камеры, работающие в интервале температур $-20^{\circ}\div +15^{\circ}\text{C}$, охлаждаются обычно коммерческими холодильными машинами.

3. Фотоаппарат и осветительная система

Следы частиц в пузырьковой камере фотографируются стереофотоаппаратом с двумя или тремя объективами. Наличие третьего объектива позволяет получить три стереопары вместо одной.

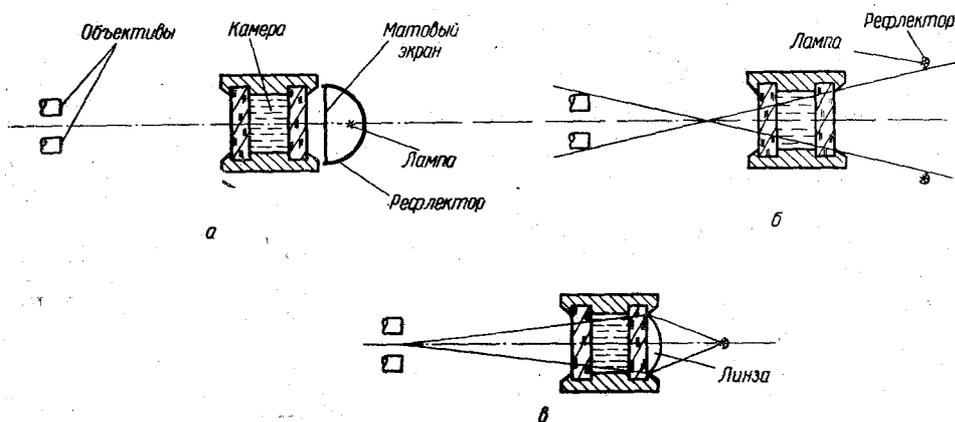


Рис. 3. Системы освещения.

Освещение камеры производится с помощью импульсных ламп. Для фотографирования чистых камер, если они работают при низких для данной жидкости температурах, применяются лампы с длительностью вспышки в несколько микросекунд.

Для фотографирования металлических камер, которые могут работать только в режимах с малой скоростью роста пузырьков, вполне удовлетворительные результаты дает применение ламп с миллисекундной вспышкой **).

Существует несколько методов освещения камеры (рис. 3). Во всех методах фотографирование производится под малым углом к прямому пучку света, так как пузырьки пара рассеивают свет в основном вперед (для водорода, например, половина угла раствора диаграммы рассеяния равна $6^{\circ}15'$). Однако не исключена возможность освещения и под углом 90° .

На рис. 3, а показан способ, называемый «фотографированием на ярком фоне». Между камерой и осветительной лампой ставится малый экран, рассеивающий свет. На пленку фотоаппарата проектируются силуэты пузырьков, поэтому на позитиве получаются темные пузырьки на светлом фоне.

На рис. 3, б показано освещение по методу «на просвет». В этом случае лампы устанавливаются так, чтобы в объективы фотоаппарата не попадал прямой свет.

*) Например, термостат ТС-15М.

***) Часто применяются импульсные лампы типа ИПК-200 (400, 600), а также более компактные ИСС-250 (цифра показывает энергию вспышки в джоулях). Для этих ламп требуется высоковольтное (до 2000 в) питание. Для освещения небольших камер наиболее удобны, по-видимому, лампы ИС-50, питающиеся от напряжения 300 в. Их энергия вспышки может быть доведена до 140 джс.

На рис. 3, в изображен метод освещения «на просвет с линзой». Положение источника света выбирается так, чтобы прямой свет сходилась в точку между объективами фотоаппарата.

По способу «в» получаются наиболее контрастные снимки. Большим преимуществом этого метода является также то, что прямой свет не попадает на стенки камеры и поэтому используется весь освещенный объем.

При помещении камеры в магнитное поле существенно, чтобы осветительная система занимала как можно меньше места. В работах^{15, 16, 17} описаны модификации метода «на просвет», приспособленные специально для этого случая.

4. Обработка снимков

Ввиду большой плотности вещества в пузырьковой камере вероятность появления на снимке события, требующего количественной обработки, довольно велика. Обработка снимков является узким местом в вопросе использования данных, получаемых с помощью пузырьковой камеры.

До настоящего времени не опубликовано сколько-нибудь подробного описания приборов для обработки снимков. Имеются только общие указания. Так, например, Дж. П. Браун и др.¹⁸ сообщили в общих чертах о развитии ими полуавтоматического метода обработки. Метод состоит из следующих ступеней:

1. С помощью компаратора измеряются координаты соответствующих точек на парных стереоснимках.
2. Измеренные координаты автоматически записываются на перфорированных карточках.
3. На электронной вычислительной машине вычисляются правильные трехмерные координаты точки. При вычислениях учитываются коэффициенты преломления стекла и жидкости.
4. Для исключения оптических и пленочных (связанных с положением пленки в фотоаппарате) искажений вместе с камерой фотографируется точная координатная сетка.
5. По полученным координатам электронная машина вычисляет длины треков, углы между треками, кривизну следов и углы многократного рассеяния.
6. Вычисляются энергии и импульсы частиц при различных предположениях относительно природы этих частиц.

5. Водородные камеры

При конструировании водородных камер возникают специфические трудности, связанные с использованием материалов при низких температурах и с необходимостью иметь хорошую теплозащиту.

Первые водородные камеры относились к типу чистых камер^{4, 19}. Как все камеры этого типа, они имели небольшие размеры—несколько десятков см³. Подробное описание чистой водородной камеры можно найти, например, в работе¹⁹.

Увеличение размеров водородных пузырьковых камер с необходимостью привело к замене стеклянного корпуса металлическим²⁰. В настоящее время известны работающие водородные пузырьковые камеры, имеющие значительные размеры: цилиндрическая камера диаметром 25 см и глубиной 16 см¹⁵ и прямоугольная камера размером 15×7,5×5 см³²¹. Первая из этих камер работает в магнитном поле напряженностью 7000 гаусс. В¹⁵ сообщается о планах постройки водородной камеры размером

$183 \times 50 \times 38$ см³. Эта камера будет работать в магнитном поле напряженностью 15 000 гаусс.

Для смотровых окон водородных пузырьковых камер употребляется пирексовое стекло, которое не трескается при охлаждении до водородных температур.

Наибольшие трудности, возникающие при конструировании металлических водородных пузырьковых камер, заключаются, по-видимому, в проблеме соединения смотровых стекол с корпусом. Попытки применить коваровые, фторопластовые и золотые прокладки не имели успеха. Удовлетворительные результаты были получены с прокладками из свинцовой проволоки. В работе²⁰ приведено подробное описание довольно сложного способа изготовления таких прокладок. Гораздо лучше зарекомендовали себя прокладки специальной конфигурации из отожженной меди²². Они выгодно отличаются от свинцовых тем, что допускают несколько разборок.

В настоящее время существует два основных метода охлаждения водородных камер: а) камера имеет хороший тепловой контакт с резервуаром, где кипит водород под давлением 4,5 атм^{21, 22}. (Это соответствует примерно 27° К, т. е. рабочей точке водородной камеры.) Регулировка температуры осуществляется посредством поддержания постоянного давления паров кипящего водорода. б) Камера имеет более слабый тепловой контакт с резервуаром, где водород кипит при атмосферном давлении²⁰. Величина контакта подбирается такой, чтобы камера теряла посредством него тепла несколько больше, чем она приобретает извне. Разница в потоках тепла компенсируется подогревом камеры электрической печкой. Способ а) экономичнее способа б) по количеству жидкого водорода, используемого для охлаждения камеры.

Сброс давления в водородных камерах осуществляется либо путем расширения паровой фазы^{20, 15}, либо расширением самого жидкого водорода с помощью сильфона^{19, 22} или поршня²¹. Первый метод менее экономичен.

На рис. 4 приведен продольный разрез водородной камеры, сконструированной группой советских физиков²². Вокруг цилиндрического рабочего объема 2, диаметр и высота которого равны 10 см, концентрически располагается водородная ванна 3. Водородная ванна сообщается с помощью трубок с резервуаром для жидкого водорода 6. (На чертеже эти трубки не показаны.) Резервуар заполняется жидким водородом через зажим 10. Регулирующий клапан 14 позволяет поддерживать автоматически давление в водородной ванне во время работы с точностью до нескольких сотых атмосферы.

Заполнение рабочего объема производится через тонкую трубку в верхней части камеры, запирающуюся с помощью пневматического (гелиевого) клапана 4, служащего одновременно и клапаном аварийного сброса давления. Гелиевая линия контролируется электромагнитным клапаном 13. Перед заполнением водород очищается в ловушке с пентаоксидом фосфора 5 и в ловушке с активированным углем 9, освобождается от механических примесей в фильтре 11 и охлаждается жидким азотом в резервуаре 8. На водородной линии стоит предохранительный клапан 12.

К нижней части камеры крепится сильфонное расширительное устройство 16. С помощью трубчатого штока 17 глухое днище сильфона расширительного устройства соединяется с поршнем гидравлического привода, конструкция которого описана в работе¹⁰. (На рисунке: 19—резиновая мембрана, 18—ограничитель хода.)

Камера, водородная ванна и резервуар для жидкого водорода изготовлены из нержавеющей стали.

Для уменьшения нагрева камеры тепловым излучением боковые стенки закрыты коническими медными радиационными экранами, находящимися в надежном тепловом контакте с водородной ванной.

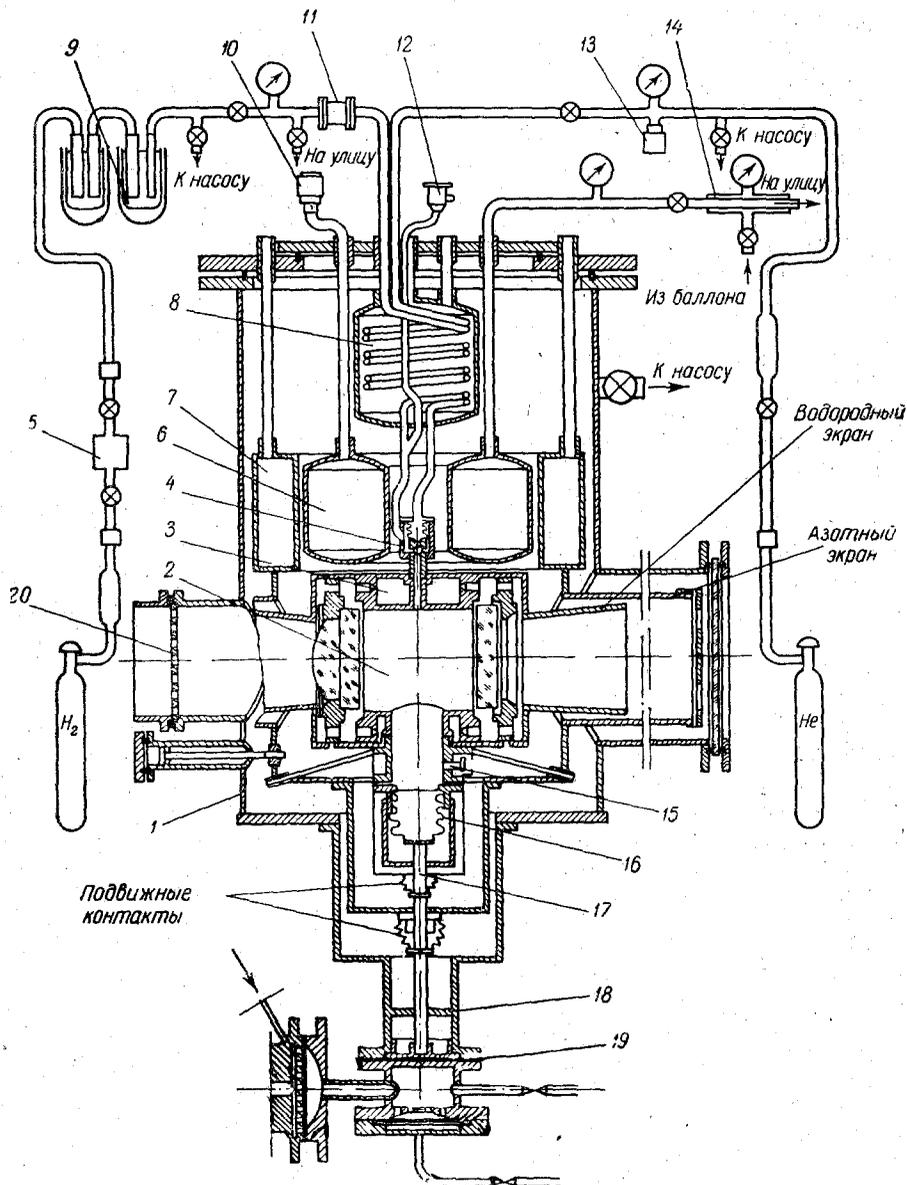


Рис. 4. Водородная пузырьковая камера.

В горловине камеры располагается емкостный измеритель давления **15**. Все детали камеры, находящиеся при температуре жидкого водорода, окружены радиационным экраном **7**, охлаждаемым до температуры жидкого азота.

Для уменьшения подвода тепла через расширительное устройство к штоку в двух местах припаяны кольца. С помощью гибких медных про-

водников верхнее кольцо приводится в контакт с водородной ванной, а нижнее—с азотным экраном.

Камера с азотным экраном размещена в вакуумном кожухе 1, откачиваемом диффузионным насосом. В нижней части вакуумного кожуха находится предохранительный клапан 20 (на рисунке он условно повернут на 90°).

III. РАБОЧИЕ ЖИДКОСТИ

Выбор рабочей жидкости определяется соображениями удобства и требованиями конкретной физической задачи. Под соображениями удобства понимаются требования не слишком высоких $T_{кр}$ и $p_{кр}$, прозрачности, химической устойчивости, неядовитости, невзрывоопасности, минимальной химической активности и т. д.

В настоящем разделе кратко описываются жидкости, уже опробованные в качестве рабочих тел пузырьковых камер, а также обсуждаются вещества, применение которых могло бы расширить возможности этого прибора. Сводный список жидкостей приведен в таблице I; звездочками отмечены вещества, еще не использовавшиеся в пузырьковых камерах (номера 7, 13—15, 17—19 и 21).

В столбцах 3, 4, 5 приведены температуры кипения при атмосферном давлении, критические температуры и критические давления.

В столбце 7 приведены практически применяемые рабочие температуры, а в столбце 6—вычисленные по формуле

$$\theta_{\text{раб}} = \theta_{\text{кип}} + 0,75(\theta_{\text{кр}} - \theta_{\text{кип}}). \quad (6)$$

Здесь $\theta_{\text{кип}}$ —температура кипения при давлении 1 атм, а $\theta_{\text{кр}}$ —критическая температура. Формула (6) полезна для приближенной оценки рабочей температуры (подробнее о ней—в следующем разделе).

В столбце 8 приведены давления насыщенных паров в рабочей точке. Для еще не использовавшихся жидкостей приведены давления насыщенных паров при температурах, взятых из столбца 6. В тех случаях, где давление насыщенных паров неизвестно, приводится величина 0,56 $p_{кр}$. Эти значения стоят в скобках.

Об относительной величине плотности в рабочей точке можно судить по плотности в критической точке (столбец 9). В столбце 10 приведены плотности при температурах, указанных в скобках. Там, где температура не указана, плотности относятся к рабочим температурам.

В столбце 11 указаны радиационные длины в $г/см^2$, вычисленные по формуле ²³

$$\frac{1}{X_0} = 4\alpha N \frac{Z^2}{A_1} r_e^2 \ln 183Z^{-1/3}. \quad (7)$$

Все жидкости, помещенные в таблицу, бесцветны, за исключением молибденового водорода HI, имеющего бледно-желтую окраску.

1. Органические жидкости

Значительное количество органических жидкостей может быть использовано в пузырьковых камерах при разумных значениях рабочих температур и давлений. До настоящего времени были опробованы следующие вещества: диэтиловый эфир $(C_2H_5)_2O$ ², изо-пентан C_5H_{12} ⁵, *n*-пентан C_5H_{12} ³⁸, пропан C_3H_8 ^{13, 10, 40}, этилен C_2H_4 ^{24, 18} и бутан C_4H_{10} . Из перечисленных жидкостей наиболее удобен пропан. Его рабочая температура равна 64° С, в то время как у первых трех жидкостей и у бутана рабочие температуры лежат значительно выше 100° С, а рабочая точка этилена лежит

Рабочие жидкости

№ п/п	Название жидкости	Формула	$\theta_{\text{кип}}$ °С	$\theta_{\text{крит}}$ °С
	1	2	3	4
1	Этиловый эфир	$(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$	34,6	193,8
2	Изо-пентан	C_5H_{12}	28	187,8
3	<i>n</i> -пентан	C_5H_{12}	36,2	197,2
4	Пропан	C_3H_8	-42,17	95,6
5	Этилен	C_2H_4	-103,9	9,7
6	Бутан	C_4H_{10}	-0,6	153
7	Этан	C_2H_6^*	-88,3	32,1
8	Фреон-13 (Ф-13)	CClF_3	-80	28,8
9	Фреон-12 (Ф-12)	CCl_2F_2	-29,8	111,5
10	Водород	H_2	-252,8	-240
11	Гелий	He	-268,9	-267,9
12	Ксенон	Xe	-107,1	16,6
13	Фреон-143 (Ф-143)	$\text{C}_2\text{H}_3\text{F}_3^*$	-47,3	71,4
14	Профторан (перфторпропан)	C_3F_8^*	-38	80
15	Бор треххлористый	BCl_3^*	12,5	178,8
16	Углекислота	CO_2	-78,5	31,1
17	Хлористый водород	HCl^*	-83,7	51,4
18	Иодистый водород	HI^*	-36	151
19	Криптон	Kr^*	-152,9	-63
20	Олово хлористое	SnCl_4	114,1	318,7
21	Метфорилбромид	CBrF_3^*	-58,67	66,6
22	60% Ф-13+40% Ф-12			
23	30% Ф-13+70% Ф-12			
24	Вольфрам шестифтористый	WF_6		

Таблица I

пузырьковых камер

$P_{крит}$ атм	$\theta_{раб}$ выч. °C	$\theta_{раб}$ практ. °C	P_{∞} атм	$d_{крит}$ е/см ³	d г/см ³	Рад. длина г/см ²
5	6	7	8	9	10	11
35,5	153	144	16	0,263	0,53	53
32,8	147	157	(19)	0,234		58
33	157	155	17	0,232	0,626(20)	58
43	61	64	24	0,226	0,585(-44,5)	58,5
50,9	-18	-20	26	0,22	0,414	57
36	110		19	0,225		58
48,8	5		26	0,21	0,546(-88)	59
39,4	-1,5	0	20	0,58		33
40,86	64	75	20	0,558		25
12,8		27° K	5	0,031	0,06	138
2,26		4,2° K	1	0,069	0,118	144
58,2	-15	-20	26,7	1,155	2,3	8,5
42	42		(23)			42
25	21		(14)		1,45	40
38,2	156		28		1,434(0)	21,6
73	0		34	0,46	0,92	42,5
81,6	17		37	0,42	1,194(-86)	35
82	105		42		2,85(-4,7)	8,8
54	-86		30	0,78	1,76	11,6
37	268	265	17,5	0,742		12,5
39,5	27		(22)		1,665(10)	14,3
		18÷38	22÷30,8			
		43÷52	22,6÷27,7			
		149	27		2,42	9,2

при -20°C . Стоимость технического пропана, употребляемого для отопления, невелика, однако он требует предварительной фракционной перегонки, так как содержит много примесей непредельных углеводородов. Давление насыщенных паров в рабочей точке для всех перечисленных жидкостей лежит в пределах $20 \div 30$ атм.

В пузырьковых камерах, работающих на органических жидкостях, употребляются фторопластовые прокладки и мембраны. Следует иметь в виду, что пары органических жидкостей легко воспламенимы и образуют с воздухом взрывчатые смеси.

Основным достоинством органических жидкостей является большое содержание водорода. Их плотности в рабочей точке лежат в пределах $0,4 \div 0,5$ г/см³, причем примерно 0,1 г/см³ составляет водород. Таким образом, количество водорода в них в 1,5 раза больше, чем в водородной камере, где плотность равна 0,06 г/см³.

Камеры на органических жидкостях можно применять в комбинации с магнитным полем, так как среднее Z этих жидкостей невелико и соответственно не слишком велики искажения из-за многократного кулоновского рассеяния. Однако значение напряженности магнитного поля должно быть довольно высоким^{16, 17}. В работе¹⁷ приведено подробное описание пропановой камеры размером $8 \times 16 \times 32$ см³, работающей в импульсном магнитном поле напряженностью 22 000 гаусс.

2. Неорганические жидкости

Из всех жидкостей, применяемых в пузырьковых камерах, жидкий водород обладает наиболее ценными для физики частиц высоких энергий свойствами. В отличие от органических жидкостей, он представляет собой чистую протонную мишень. Водородные пузырьковые камеры могут быть широко использованы для изучения взаимодействий быстрых частиц с протонами. Значительным достоинством этих камер является возможность применения их в комбинации с магнитным полем. Главный недостаток водородных пузырьковых камер заключается в трудностях, связанных с работой при низких температурах, и в опасности взрыва*).

Рабочая точка водородной камеры лежит при 27°K и 5 атм; плотность жидкости в этой точке равна 0,06 г/см³. Рабочая точка дейтериевой камеры лежит несколько выше.

Значительный интерес представляет камера, работающая на жидком ксеноне^{24, 18}. Наиболее ценными свойствами ксенона являются большая тормозная способность и высокая эффективность регистрации γ -квантов.

Плотность ксенона в рабочей точке равна 2,3 г/см³, т. е. в 38 раз выше плотности жидкого водорода. Благодаря высокой плотности и большому Z жидкий ксенон имеет очень короткую радиационную длину — всего 3,6 см.

Будучи близкой по своим свойствам к фотоэмульсиям, ксеноновая камера значительно превосходит их по возможным размерам и по легкости обработки следов; однако существенно уступает им по разрешающей способности.

Сильное многократное кулоновское рассеяние в ксеноне дает возможность определения энергий частиц вплоть до весьма высоких значений. Вместе с тем многократное рассеяние исключает, к сожалению, возможность применения магнитного поля.

При первых попытках использования ксенона в качестве рабочего тела пузырьковой камеры было обнаружено, что в перегретом чистом ксеноне следы ионизирующих частиц не отмечаются цепочками пузырьков. Браун

*) Техника безопасности при работе с водородными камерами изложена в⁴⁵.

и др.²⁴ объяснили этот факт тем, что большая часть энергии, теряемой частицей при прохождении через ксенон, выделяется в виде электромагнитного излучения (высвечивается), не приводя, таким образом, к образованию трека. (В настоящее время известно, что жидкий ксенон действительно сцинтиллирует⁴⁶). При добавлении 2% по весу этилена, гасящего сцинтилляции, в ксеноновой камере стали развиваться треки. Минимальное количество этилена, необходимое для этой цели, Глэзер оценивает в 0,1%¹⁸.

Ксенон очень дорог, однако, учитывая возможность многократного его использования, можно считать, что по стоимости ксеноновая камера сравнима с большими фотоэмульсионными камерами.

Большую ценность для работ, связанных с определением изотопического спина и четности странных частиц, представляет камера, наполненная жидким гелием, изотопический и действительный спины которого равны нулю. В настоящее время известна гелиевая камера объемом 240 см³^{25, 26, 27}. Камера изготовлена из стекла, расширение производится с помощью тефлонового поршня, находящегося в непосредственном контакте с жидкостью.

В²⁷ сообщается о проектируемой постройке гелиевой камеры объемом 15 л.

Гелиевая камера может работать в очень широком диапазоне температур—от 4,2° К до 3,1° К, что означает изменение температуры на 25% (для пропана, например, это означало бы перемещение рабочей точки от +64° С до -10° С). При 4,2° К давление насыщенных паров гелия равно 1 атм. Для появления чувствительности к ионизирующим частицам достаточно уменьшить давление на 150 мм рт. ст. Коэффициент расширения при этом равен 0,5%. При 3,1° К давление насыщенных паров равно 200 мм рт. ст. (менее 0,1 р_{кр}!). При низких температурах падает число пузырьков на единицу длины следа частицы. Так, при уменьшении температуры от 4,2° К до 3,1° К число пузырьков уменьшается от 40 см⁻¹ до 10 см⁻¹.

Большое количество жидкостей, подходящих по своим термодинамическим свойствам для работы в пузырьковых камерах, находится среди фреонов. Фреонами называются хлоро- и фторпроизводные от углеводородов, употребляющиеся в холодильной технике. Большинство фреонов при нормальных условиях представляют собой тяжелые бесцветные газы. Фреоны безвредны, негорючи, невзрывоопасны и почти не имеют запаха. К настоящему времени применение нашли только фреон-13 (CClF₃) и фреон-12 (CCl₂F₂)^{28, 29, 11}. Эти вещества производятся промышленностью. Чистота коммерческого фреона-13 вполне удовлетворительна.

Во фреоновых камерах, работающих при невысоких температурах, в качестве смотровых стекол можно применять органическое стекло, а в качестве мембран—гладкую резину.

Опубликованы сведения об удачном использовании в пузырьковой камере четыреххлористого олова SnCl₄ и шестифтористого вольфрама WF₆³⁰. Камера на SnCl₄ работает при температуре 265° С и давлении 17,5 атм. Камера на WF₆, имеющая размер около 4 см (по-видимому, диаметр), изготовлена из монеля (пригоден также инконель); смотровые стекла изготовлены из кварца. Камера работает при температуре 149° С и давлении 27 атм. Плотность жидкости при этом равна $d = 2,42 \pm 0,3$ г/см³, т. е. выше, чем у жидкого ксенона; радиационная длина составляет 3,8 см. Недостатком WF₆ является высокая химическая активность. В³⁰ сообщается, что сейчас проектируется камера на WF₆ размером 30 см. Шестифтористый вольфрам может стать серьезным «конкурентом» ксенона.

Из приведенных во второй половине таблицы жидкостей очень удобны по своим рабочим параметрам фреон-143 и перфторпропан C₃F₈. Критиче-

ская температура перфторпропана вычислена. Если это значение оправдается, то перфторпропан будет, по-видимому, одной из наиболее удобных жидкостей.

Треххлористый бор интересен как высокоэффективный регистратор нейтронов. Плотность ядер бора в нем примерно в 500 раз больше, чем в нейтронном счетчике, наполненном газообразным BF_3 до давления 500 мм рт. ст. В камере, наполненной BCl_3 , каждый захватившийся нейтрон будет отмечен одним пузырьком (пробег α -частиц в жидкости очень мал), поэтому жидкость должна быть чиста от механических примесей, могущих явиться центрами паразитных вскипаний. BCl_3 ядовит и разъедает резину. Корпус камеры для этой жидкости может быть изготовлен из нержавеющей стали, прокладка и мембрана—из фторопласта.

Замечательной особенностью углекислого газа⁴⁷ является равенство нулю действительных и изотопических спинов обоих ядер, входящих в его состав. В этом отношении он аналогичен гелию.

Иодистый водород, криптон и метфорилбромид приведены в качестве возможных заменителей ксенона. Наиболее обещающим является метфорилбромид CF_3Br , аналог фреона-13. У него умеренное критическое давление, а рабочая температура будет лежать, вероятно, несколько выше комнатной³¹. О свойствах его известно мало, однако аналогия с фреоном-13 позволяет надеяться на безвредность и химическую инертность.

Приведенные в таблице I величины взяты большей частью из двух справочников: «Справочника физика-экспериментатора» Д. Кэя и Т. Лэби и справочника «Handbook of Chemistry and Physics» под редакцией Ч. Д. Ходсмана, 33-е издание.

3. Пересыщенные газовые растворы

В 1956 г. Арган и Гигли сообщили³² о разработанном ими новом виде пузырьковой камеры, в котором использовался несколько иной тип метастабильности, а именно метастабильность пересыщенных растворов газов в жидкостях. Эта камера получила название «газовой пузырьковой камеры». Более точным было бы название «газированной» камеры.

Первая использованная ими жидкость представляла собой пересыщенный раствор CO_2 в диэтиловом эфире. Пересыщение достигалось сбросом давления от 50 до 1 атм, аналогично тому, как это делается в обычной пузырьковой камере. Камера работала при комнатной температуре, причем влияния колебаний температуры на работу камеры не было замечено.

Вскоре теми же авторами были испытаны две другие пары: метан—пропан, с молярной концентрацией метана 0,117, и углекислый газ—пропан, с молярной концентрацией углекислого газа 0,2÷0,3³³. По количеству водорода особенно удачен первый раствор. В этих двух случаях давление сбрасывалось от 30 до 1 атм. Подробное описание рабочих характеристик метан-пропановой камеры можно найти в работах^{34, 42}.

Одновременно с работой³² были проведены испытания растворов CO_2 в *n*-гексане и CO_2 в триэтилаmine³⁵.

Из перечисленных жидкостей к собственно «газированному» типу относятся только растворы CO_2 в эфире, *n*-гексане и триэтилаmine. Растворы метан—пропан и углекислый газ—пропан можно отнести скорее к смесям жидкостей, описываемым в следующем параграфе. Имеются данные, свидетельствующие о том, что в таких бинарных смесях рост пузырьков идет в основном за счет растворителя, а не растворенного газа⁴⁸. Роль газа в этом случае сводится к снижению коэффициента поверхностного натяжения.

4. С м е с и ж и д к о с т е й

В начале 1957 г. Блиновым и др. была предпринята удачная попытка использования в пузырьковой камере смесей двух жидкостей²⁹. Цель их экспериментов заключалась в получении жидкости, рабочая температура которой лежала бы несколько выше комнатной, что наиболее удобно для работы и для стабилизации температуры. Они смешивали фреон-13 и фреон-12. Рабочие температуры и давления использованных ими смесей приведены в конце таблицы I. Приблизительный состав смесей указан в объемных процентах. Оптимальная рабочая температура первой смеси равна 26° С; давление насыщенных паров равно при этом 25,6 атм.

Можно не сомневаться, что будут работать и другие смеси, если только компоненты достаточно хорошо смешиваются друг с другом. Среди органических жидкостей подходящими компонентами для получения смесей с комнатными рабочими температурами будут, по-видимому, этан и этилен, с одной стороны, и пропан, бутан и пентан, с другой стороны.

Камеры, в которых используются смеси жидкостей, могут работать практически с той же скоростью, что и однокомпонентные камеры, вплоть до очень коротких циклов, порядка десятых долей секунды.

Применение газовых растворов и смесей жидкостей в пузырьковых камерах существенно расширяет возможности этого прибора. Кроме того, что рабочая температура может быть сдвинута в область комнатных температур, двухкомпонентная камера будет, по-видимому, обладать более широким ассортиментом рабочих веществ.

В заключение этого раздела следует отметить, что из всех рабочих жидкостей в настоящее время наиболее широкое распространение получили жидкий водород и пропан. Первый из них сохраняет свое значение и в будущем, а пропан, без сомнения, будет в ближайшее время вытеснен смесями органических жидкостей.

IV. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЗЫРЬКОВЫХ КАМЕР

1. В ы б о р т е м п е р а т у р ы и д а в л е н и я

Диапазон рабочих температур большинства жидкостей довольно широк, составляя 20—25° С (здесь речь идет о камерах с ограничением по давлению). Верхняя граница диапазона определяется появлением «тумана» (см. раздел I). Нижняя граница определяется температурой, при которой максимальное значение разности $[p_{\infty}(\theta) - p_n]_{\max} = p_{\infty}(\theta) - 1$ становится недостаточным для того, чтобы сделать камеру чувствительной. Возможно некоторое расширение рабочего диапазона температур за счет применения отрицательного давления^{36, 37}, однако практически это неудобно.

Грубая оценка рабочей температуры может быть произведена с помощью эмпирической формулы (6). О степени точности такой оценки можно судить по таблице I, где в столбце 7 приведены практически применяемые температуры, а в столбце 6—вычисленные по формуле (6).

Выбор начального, или верхнего, давления p_n зависит от требований, предъявляемых к длительности рабочего цикла. При увеличении p_n уменьшается время «захлопывания» пузырьков и, следовательно, укорачивается рабочий цикл. По этой причине величина p_n выбирается обычно на 10—15 атм выше давления насыщенных паров.

Уровень p_n , до которого сбрасывается давление в камере, определяется требованиями к величине чувствительности камеры. Увеличивая p_n ,

можно, например, сделать камеру нечувствительной к релятивистским частицам. Время сброса давления от p_B до p_H составляет, как правило, 3—5 мсек. Величина $p_\infty - p_H$ лежит обычно в пределах 5—15 атм, что соответствует перегреву в 10—15° С.

2. Коэффициент расширения

Коэффициент расширения $\frac{\Delta V}{V}$ зависит от рода применяемой жидкости. Для органических жидкостей и для фреонов он равен примерно 3%^{5, 28}, для водорода 1,8²¹, для гелия 0,5—1%^{26, 27} (все данные относятся к $p_H = 1$ атм).

3. Чувствительность

Чувствительность камеры, или плотность следов ионизирующих частиц (число пузырьков на единицу длины следа), зависит от режима работы камеры и от скорости частиц. Зависимость чувствительности от режима

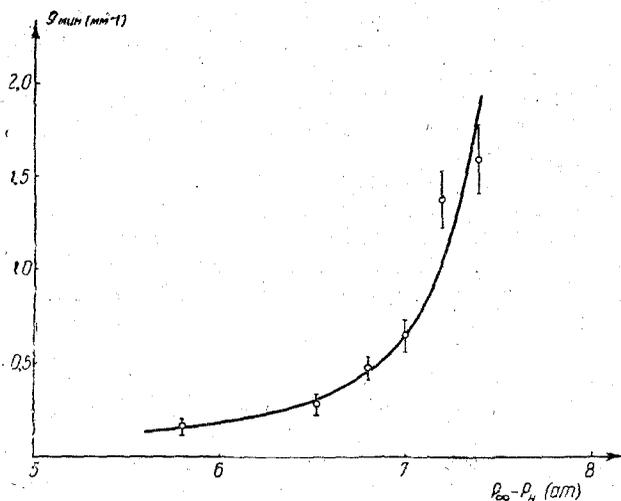


Рис. 5. Зависимость плотности следов от величины $p_\infty - p_H$.

работы и от сорта применяемой жидкости может быть качественно оценена с помощью формулы (4). Чувствительность возрастает с увеличением рабочей температуры (при $p_\infty(t) - p_H = \text{const}$). Очень резко зависит чувствительность от величины $p_\infty - p_H$; эта зависимость⁸ показана на рис. 5. По оси ординат отложена плотность следов релятивистских частиц; кривая снята при постоянной температуре. При сбросе давления происходит адиабатическое охлаждение жидкости, поэтому величина p_B также влияет, по-видимому, на чувствительность камеры, однако это влияние относительно невелико. Зависимость плотности следа от скорости частиц будет рассмотрена в следующем разделе.

4. Время чувствительности и скорость роста пузырьков

Очень важной характеристикой камеры является время чувствительности τ . Камера перестает быть чувствительной в результате повышения давления, связанного со вскипанием жидкости на прокладках, мембране,

стенках камеры, следах ионизирующих частиц и т. д. Чистые камеры, в которых количество центров вскипаний сведено к минимуму (стенки и следы частиц), имеют значительно более длительное время чувствительности, чем металлические камеры. Время чувствительности чистых камер падает с увеличением объема. Для чистой камеры объемом $V = 450 \text{ см}^3$ (пентан)¹² $\tau = 0,1 \text{ сек}$; для камеры с $V = 63 \text{ см}^3$ (водород)¹⁹ $\tau = 1/4 \text{ сек}$; для камеры с $V = 40 \text{ см}^3$ (изо-пентан)³⁶ $\tau = 2 \text{ сек}$ и, наконец, в первой камере Глэзера (этиловый эфир, $V = 3 \text{ см}^3$) это время равнялось нескольким секундам. Для металлических камер максимальное значение τ в настоящее время равно 40 мсек ¹⁰ ($V = 600 \text{ см}^3$, пропан).

Время чувствительности металлических камер в значительной мере зависит от максимально возможного коэффициента расширения. Это связано с тем, что нижнее давление, а вместе с ним и чувствительность остаются постоянными до тех пор, пока мембрана ограничивающего устройства (рис. 2, мембрана 8) не ляжет на опорную решетку.

Величина τ зависит также от скорости роста пузырьков. Чем больше эта скорость, тем быстрее будет выбран запасной объем под мембраной и тем короче будет время чувствительности. Скорость роста пузырьков зависит от рабочей температуры камеры; с ростом температуры она падает. Так, например, в изо-пентановой камере, работающей при 127°C , пузырьки вырастают за 2 мсек ³⁶, в то время как в *n*-пентановой камере (*n*-пентан почти не отличается по своим свойствам от изо-пентана), работающей при 155°C , время роста равно 3 мсек ³⁸ (такое время роста характерно для большинства металлических камер). Аналогичное явление имеет место в гелиевой камере. При изменении температуры от $4,2^\circ \text{K}$ до $2,9^\circ \text{K}$ скорость роста пузырьков в ней изменяется в 10 раз: от $0,1 \text{ мм}$ за 30 мсек до 1 мм за те же 30 мсек ²⁷.

Чистые камеры обычно работают при относительно низких температурах, когда скорость роста пузырьков велика. Первое же закипание повышает давление в камере настолько, что чувствительность практически мгновенно исчезает. Вероятность паразитного вскипания пропорциональна величине поверхности камеры, с чем и связано, вероятно, уменьшение времени чувствительности чистой камеры при увеличении объема. В металлических камерах, которые работают при высоких температурах, когда скорость роста пузырьков мала, должна наблюдаться обратная картина, так как скорость вскипания жидкости, отнесенная к единице объема, падает с увеличением размеров камеры. Очень «холодные» режимы осуществимы только в чистых камерах, так как в грязных камерах в этом случае быстрый рост пузырьков на деталях камеры делает невозможным сброс давления до необходимого уровня.

Скорость роста пузырьков уменьшается с увеличением их радиуса. Это связано с охлаждением жидкости при испарении внутрь пузырька. Для водородных камер, работающих при 27°K , эмпирически подтвержден следующий закон роста радиуса пузырьков¹⁵:

$$r_{\text{мм}} = 0,1 t^{1/2} \text{ мсек.} \quad (8)$$

5. Длительность рабочего цикла и эффективность

Минимальная длительность рабочего цикла T пузырьковой камеры существенно зависит от времени, в течение которого камера выдерживается со сброшенным давлением. Если это время велико, то пузырьки, образованные на деталях камеры и на следах частиц, успеют всплыть в верхнюю часть камеры. При этом происходит перенос тепла снизу вверх,

так как теплота испарения, поглощенная пузырьками внизу, выделяется ими при захлопывании наверху. Этот процесс увеличивает длительность цикла до 1–2 мин., так как теплопроводность всех употребляемых в пузырьковых камерах жидкостей очень мала и выравнивание температуры происходит медленно. Для укорочения цикла до одной секунды и менее необходимо или уменьшить до минимума время выдержки камеры со сброшенным давлением, или поддерживать нижнюю часть камеры при более высокой температуре, чем верхнюю.

Существенно увеличивает также длительность цикла оптическая неоднородность жидкости, возникающая в результате повышения температуры жидкости в тех местах, где были «захлопнуты» пузырьки в конце предыдущего цикла.

Эффективность пузырьковой камеры, т. е. отношение времени чувствительности к длительности всего цикла, для большинства описанных в литературе установок составляет величину не более 0,3%. Сокращая длительность цикла и принимая ряд предосторожностей, можно повысить эффективность до 10%²⁸, что означает практическую возможность работы с космическими лучами.

Имеется, по-видимому, какая-то оптимальная длительность цикла, так как при укорочении цикла время чувствительности также падает. Так, например, в камере, описанной в работе²⁸, время чувствительности падало в 2,5 раза при уменьшении цикла от 200 до 100 мсек. При длительности цикла 50 мсек чувствительности не удалось получить совсем, так как жидкость вновь закипала на месте пузырьков, зажатых в конце предыдущего цикла.

Интересная попытка осуществления высокоэффективной камеры была сделана Бертанзой и др.³⁹ Идея их метода заключается в следующем. Проходящая частица запускает у.к.в.-генератор, работающий на волновод, внутри которого помещена пузырьковая камера. Электромагнитное поле раскачивает ионы, образованные частицей при прохождении через камеру, и нагревает жидкость вдоль следа частицы, «проявляя», таким образом, трек. В работе³⁹ применялся магнетронный генератор с длиной волны $\lambda = 10$ см (2800 Мгц) и мощностью 250 вт. Длительность импульса равнялась 2 мксек. Объем камеры был равен 75 см³. Экспериментальная проверка метода не была успешной. Слегка перегретая предварительно жидкость действительно вскипала, если при прохождении частиц включался генератор, и не вскипала, если включение генератора не совпадало с прохождением частицы, однако пузырьки пара никогда не образовывали треков.

В 1957 г. Робертом Гудом⁴³ была предпринята удачная попытка создания непрерывно-чувствительной камеры, действующей аналогично обычной диффузионной камере.

Устройство камеры чрезвычайно просто. Она представляет собой стеклянный стакан объемом 600 см³, наполненный одной из следующих жидкостей: изо-амилацетат, метиловый спирт, этиловый спирт, ацетон, трибутрин. Жидкость насыщается углекислым газом при температуре сухого льда и нормальном давлении. После этого дно стакана опускается в смесь метилового спирта с сухим льдом (температура смеси — 78° С). В верхнюю часть стакана, в жидкость, вводится плоская спираль. Через спираль пропускается ток, и верхняя часть жидкости доводится до кипения. Где-то посреди стакана образуется тонкий чувствительный слой (его толщина, судя по рисунку, помещенному в статье, составляет 3–4 мм). В настоящее время камера чувствительна только к сильно ионизирующим излучениям (протоны отдачи от быстрых нейтронов), причем чувствительность сохраняется в течение нескольких часов.

6. Взаимосвязь рабочих параметров

Выяснению взаимной связи параметров, характеризующих работу пузырьковой камеры, посвящена работа Басси, Лориа и др.³³. Они исследовали зависимость времени чувствительности τ , числа пузырьков на единицу длины проекция следа частицы на плоскость снимка N и размеров пузырьков a от длительности цикла T , рабочей температуры θ , нижнего давления p_H и коэффициента расширения $\frac{\Delta V}{V}$. Величина N пропорциональна плотности следа n ; ниже она будет называться просто плотностью следа.

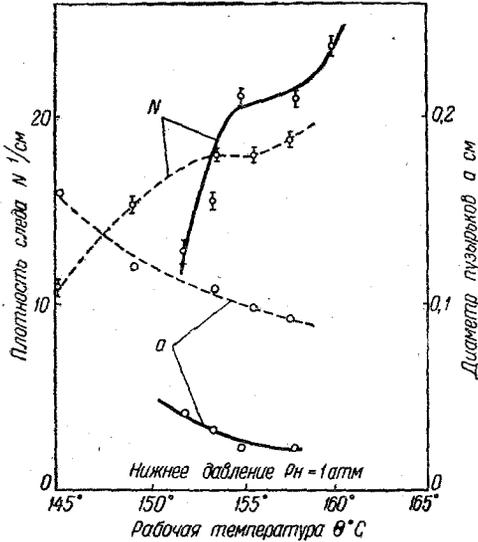


Рис. 6. Зависимость плотности следов и размеров пузырьков от температуры.

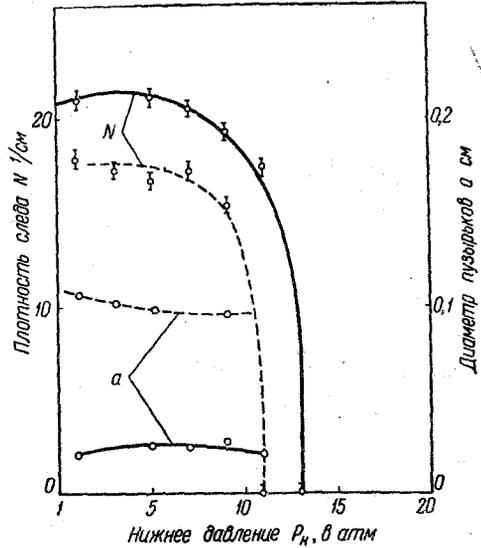


Рис. 7. Зависимость плотности следов и размеров пузырьков от нижнего давления.

В качестве рабочей жидкости использовался *n*-пентан. Исследования производились на чистой камере и на металлической камере. В обеих камерах расширительное устройство помещалось в холодной зоне. Конструкция расширительного устройства позволяла регулировать уровень p_H . Верхнее давление p_B при всех измерениях равнялось 25 атм.

Исследования с чистой камерой обнаружили, что в отсутствие γ -источника кипение всегда начинается со стенок. Авторы измерили относительную «чистоту» нескольких поверхностей, приняв за критерий чистоты максимальную температуру, при которой данная поверхность не вызывает кипения в перегретой жидкости в течение определенного времени. В пентане при $p_H=1$ атм одинаковое время задержки вскипания было получено для стекла при 150° С, для фторопласта и резины—при 50° С, для аралдита (araldite—по-видимому, какая-то синтетическая смола)—при 100° С. Полированная металлическая поверхность может быть сделана одинаковой «чистоты» со стеклом.

На рис. 6 приведена зависимость чувствительности камеры и размеров пузырьков от рабочей температуры. Пунктирные кривые относятся к стеклянной камере, сплошные—к металлической. Фотографирование производилось через 3 мсек после возникновения в камере комптоновских

электронов, поэтому термин «размер пузырька» имеет вполне определенное значение. Из рисунка видно, что имеется небольшая область температур, где зависимость чувствительности от температуры очень слаба (аналогичный ход кривой был обнаружен для пропана⁴⁰).

На рис. 7 приведена зависимость чувствительности и размеров пузырьков от величины p_n . Кривые чувствительности для обеих камер имеют

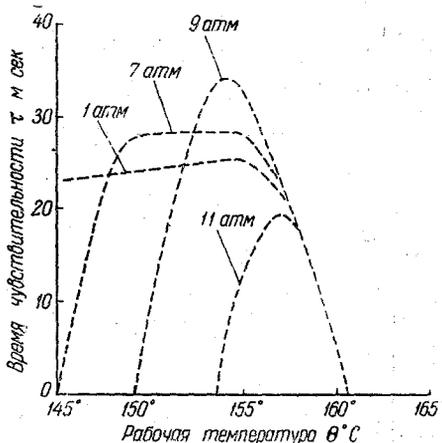


Рис. 8. Связь времени чувствительности τ , нижнего давления p_n и рабочей температуры θ для чистой камеры.

весьма широкое плато; размер пузырьков от p_n практически не зависит. Разницу в плотностях следов для стеклянной и металлической камер авторы объясняют большим влиянием эффекта перекрытия пузырьков в случае стеклянной камеры, так как размер пузырьков в ней значительно больше.

Время чувствительности существенно зависит от нижнего давления и рабочей температуры. Связь τ , p_n и θ для чистой камеры приведена на рис. 8. Величина τ измерялась через каждые 3°C ; ошибки в величине τ составляют менее 10%. Из рисунка видно, что подбором θ и p_n можно значительно увеличить время чувствительности. Из полученных данных следует, что граница тумана не зависит от p_n .

Все измерения, результаты которых приведены на рис. 6, 7 и 8, производились при длительности цикла $T=1$ мин. и $\frac{\Delta V}{V}=10,7\%$.

В таблице II приведены некоторые данные, относящиеся к связи τ , p_n , δ и T в металлической камере, снятые при $\theta=155^\circ\text{C}$. Кроме того, авторы сообщают, что при увеличении T зависимость τ от p_n слабеет и при $T \geq 4$ мин. исчезает совсем.

Таблица II

Связь времени чувствительности τ , нижнего давления p_n , коэффициента расширения δ и длительности цикла T в металлической камере при $\theta=155^\circ\text{C}$

а)	p_n 1 9 атм	$\delta=1,107$ $T=1$ мин
	τ 12 17 мсек	
б)	T 1 2 4 мин	$\delta=1,107$ $p_n=1$ атм
	τ 12 22 29 мсек	
в)	δ 1,065 1,089 1,107	$T=2$ мин $p_n=1$ атм
	τ 11 49 22 мсек	

Следует отметить, что некоторые результаты работы³⁸ вызывают сомнения. Прежде всего это относится к независимости границы тумана от нижнего давления p_n . Из работ с пропановой и фреоновой камерами известно, что туман может быть получен при любой температуре, если только разность $p_\infty - p_n$ достаточно велика.

Непонятна также разница скоростей роста в металлической и стеклянной камерах. Если бы в обеих камерах были действительно одинаковые давления и температуры, то скорости роста были бы, без сомнения, одинаковы. «Насыщение» кривых чувствительности при уменьшении величины p_n (рис. 7) связано, по-видимому, с взаимным влиянием пузырьков¹⁰, так как диаметры пузырьков относительно велики.

IV. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ЧАСТИЦ С ПОМОЩЬЮ ПУЗЫРЬКОВОЙ КАМЕРЫ

Как уже отмечалось, есть основания полагать, что зависимость плотности следа от скорости частицы должна иметь вид

$$g = g_0 \frac{Z^2}{\beta^2}.$$

Для значений $\beta \leq 0,6$ этот вывод подтвержден работой Блинова, Крестникова и Ломанова¹⁰. Они исследовали плотность следов частиц, образованных нейтронами с энергией 590 Мэв в пропановой камере. Примененный ими метод сброса давления до постоянного регулируемого уровня обеспечил высокую стабильность работы камеры, необходимую для ионизационных измерений, а также сделал возможным измерение ионизации в очень широком диапазоне — от минимальной до 80-кратной. Время чувствительности их камеры равнялось 40 мсек; длительность импульса интенсивности от ускорителя составляла 0,3 мсек.

Измерения производились на следах электронов, π -мезонов, протонов и дейтонов. Энергия частицы в каждом месте трека определялась по длине остаточного пробега.

Зависимость плотности следа от скорости частицы исследовалась при трех режимах работы камеры, отличавшихся уровнем, до которого сбрасывалось давление в камере. Температура была равна 64° С, давление насыщенных паров составляло 30 атм, верхнее давление равнялось 38 атм.

Во всех трех режимах зависимость плотности следа от скорости частицы имела один и тот же вид $\frac{g}{g_0} = \frac{1}{\beta^2}$, однако величина g_0 значительно отличалась для различных режимов. При $p_H = 24,2$ атм $g_0 = 0,155$ мм⁻¹; при $p_H = 23,5$ атм $g_0 = 0,2$ мм⁻¹ и при $p_H = 22,8$ атм $g_0 = 0,28$ мм.

Результаты измерений приведены на рис. 9. Прямая на рисунке соответствует зависимости $g/g_0 = 1/\beta^2$. Для быстрых электронов наблюдается отклонение от этой зависимости, позволяющее говорить о релятивистском возрастании плотности следов*).

Следует отметить, что при больших плотностях следов, точнее, при больших отношениях диаметра пузырька к расстоянию между пузырьками, возможны значительные искажения результатов из-за недостаточной оптической разрешающей способности аппаратуры и из-за взаимного влияния

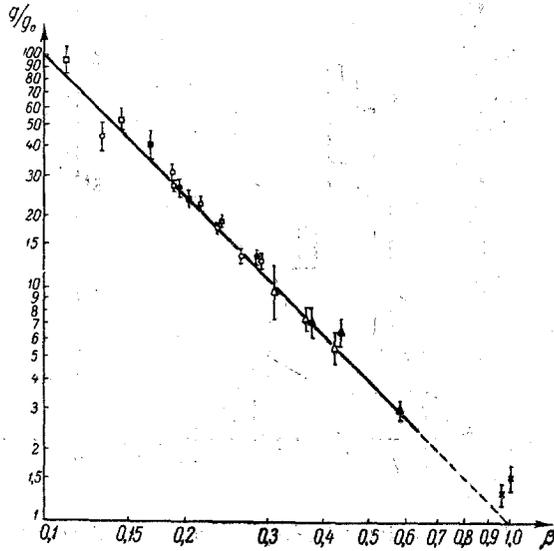


Рис. 9. Зависимость $\frac{g}{g_0}$ от β по измерениям Г. А. Блинова, Ю. С. Крестникова и М. Ф. Ломанова. Масштаб по осям логарифмический. Обозначения: \circ — протоны, \square — дейтоны и \triangle — π -мезоны для режима № 1; \bullet — протоны, \blacksquare — дейтоны и δ — электроны для режима № 2; \blacktriangle — π -мезоны и δ — электроны для режима № 3.

*) Зависимость $g/g_0 = 1/\beta^2$ была подтверждена также в⁴⁹.

близко расположенных растущих пузырьков. Последний фактор также был исследован в цитируемой работе. Полученные результаты приведены на рис. 10. В согласии с представлением о механизме образования пузырьков, изложенным в разделе I, пузырьки, как и δ -электроны, должны возникать с равной вероятностью в любой точке следа, если только скорость частицы постоянна. В таком случае вероятность появления n пузырьков на длине x дается распределением Пуассона.

Этот случай представлен на рис. 10,а. Из рис. 10,б видно, что при больших плотностях следа пузырьки располагаются вдоль пути частицы

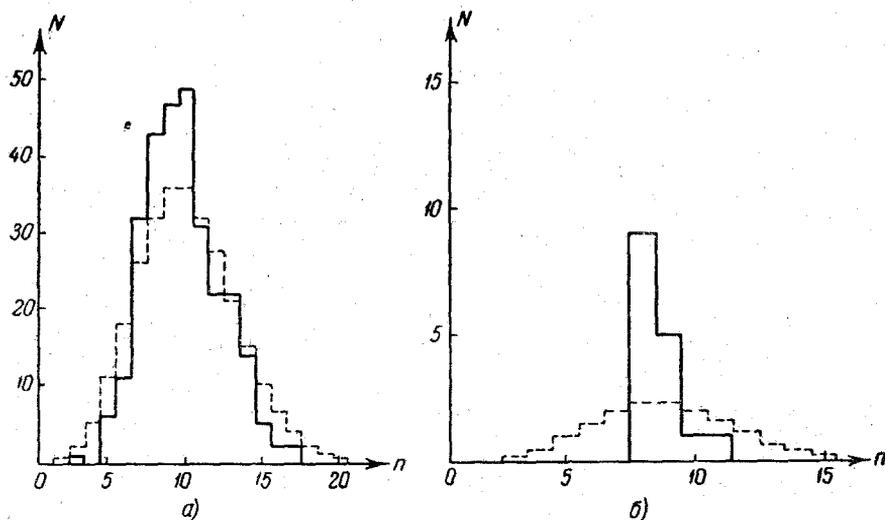


Рис. 10. Распределение случаев образования n пузырьков на отрезках длины x для следов моноэнергичных частиц: а) «хорошие» следы; взаимодействие соседних пузырьков незаметно на фотографиях. Диаметр пузырьков менее 0,05 мм, диаметр изображения пузырьков (приведенных к масштабу камеры) $D=0,1$ мм, $g=3$ мм⁻¹, $x=3,5$ мм; б) «плохие» следы, диаметр пузырьков равен диаметру изображения; $D=0,5$ мм; наблюдаемая плотность следов $g_{\text{набл}}=2$ мм⁻¹, $x=4$ мм, пунктиром представлено распределение Пуассона.

практически равномерно. В этом случае плотность следа от скорости частицы почти не зависит. В цитированной работе для ионизационных измерений употреблялись только «хорошие» следы, в которых распределение числа пузырьков на единицу длины следа соответствует рисунку 10,а.

Эффект перекрытия изображений пузырьков на пленке приводит к необходимости использования нескольких методов измерения плотности следов. Как показано в работе⁴¹, наиболее точными являются два метода измерений: метод плотности просветов и метод скважности. В первом методе измеряется число просветов на единицу длины следа частицы, а во втором—среднее отношение суммы длин просветов к длине следа. Метод плотности просветов применяется в области больших плотностей, а метод скважности—в области малых плотностей следов.

Зависимость плотности следов от скорости частиц изучалась также Глэзером, Рамом и Доддом⁴⁰. Они исследовали следы протонов и положительных π -мезонов со скоростями $\beta \geq 0,4$ в пропановой камере. Попадавшие в камеру частицы предварительно отбирались по импульсам с помощью магнита.

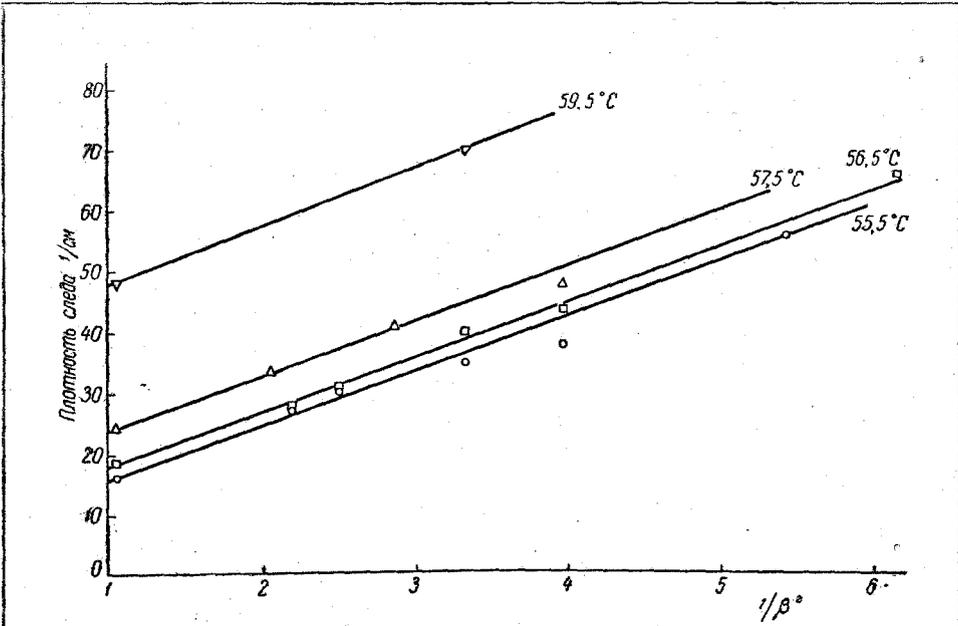


Рис. 11. Зависимость плотности следов частиц от их скорости по исследованиям Глэзера и др.

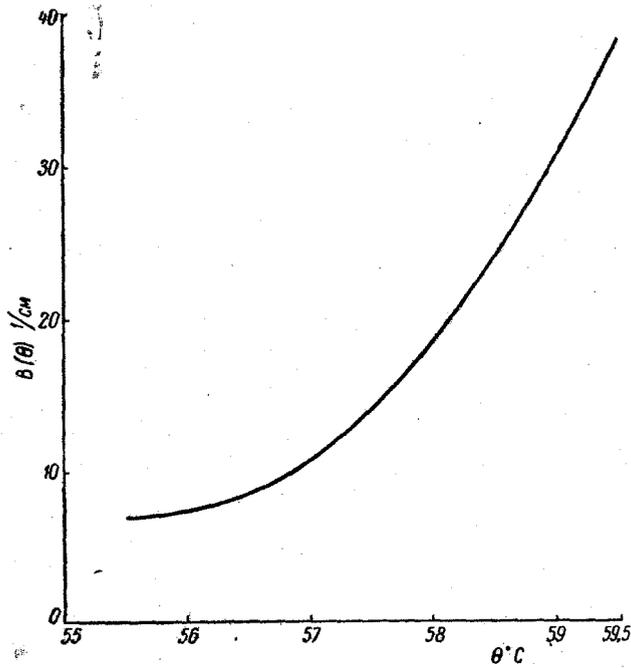


Рис. 12. Функция $B(\theta)$.

Измерения производились в интервале температур $55,5 \div 59,5^\circ \text{C}$. Результаты измерений приведены на рис. 11. Найденная ими зависимость может быть изображена формулой

$$g = \frac{g_0}{\beta^2} + B(\theta). \quad (9)$$

Величина g_0 , равная $9,2 \pm 0,2 \text{ см}^{-1}$, от температуры не зависит, а $B(\theta)$, график которой приведен на рис. 12, есть функция только температуры. Отклонение точек на рис. 11 от прямых больше ожидаемого статистического разброса и объясняется авторами нестабильностью температуры.

Зависимость вида (9) не соответствует описанной в разделе I картине процесса возникновения зародышей пузырьков. Возможно, что вид кривой (9) в значительной степени определяется конкретной конструкцией камеры, а не свойствами перегретого пропана.

Следует отметить несколько существенных факторов, способных значительно исказить результаты работы⁴⁰. Первый из них заключается в использовании метода ограничения по объему. При этом возникает некоторая неопределенность в значении нижнего давления. Это могло повести к значительным ошибкам, так как измерения производились в области, где чувствительность сильно зависит от значения нижнего давления. Этим фактором и объясняется, по-видимому, найденная зависимость от температуры. Вторым источником ошибок могло служить слишком короткое время чувствительности камеры, равное 2—3 мсек. Это особенно существенно, если учесть, что импульс интенсивности от ускорителя, имевший длительность 3 мсек, флукутировал в пределах 1 мсек относительно своего импульса. Очень велики были, по-видимому, также искажения, связанные с недостаточной разрешающей способностью оптической системы и взаимным влиянием пузырьков.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. D. A. Glaser, Phys. Rev. 87, 665 (1952).
2. D. A. Glaser, Phys. Rev. 91, 762 (1953).
3. R. H. Hildebrand and D. E. Nagle, Phys. Rev. 92, 517 (1953).
4. J. G. Wood, Phys. Rev. 94, 731 (1954).
5. D. A. Glaser and D. C. Rahm, Phys. Rev. 97, 474 (1955).
6. Л. Ландау и Е. Лифшиц, Статистическая физика, Москва, Гостехиздат, 1951.
7. D. A. Glaser, Nuovo Cim. II, Suppl. 2, 361 (1954).
8. I. Bertanza, G. Martelli and A. Zacutti, Nuovo Cim. 2, 487 (1955).
9. J. A. Pless and R. J. Plano, Rev. Sc. Instr. 27, 935 (1956).
10. Г. А. Блинов, Ю. С. Крестников, М. Ф. Ломанов, ЖЭТФ 31, 762 (1956).
11. Г. А. Блинов, М. Ф. Ломанов, А. Г. Мешковский, Я. Я. Шаламов, В. А. Шебанов, ПТЭ, № 1 (1958).
12. P. Bassi, P. Mittner and J. Scotoni, Nuovo Cim. 2, 1334 (1955).
13. Г. А. Блинов, Ю. С. Крестников, И. И. Першин, ДАН СССР 99, 929 (1954); Изв. АН СССР, сер. физ. 19, 758 (1955).
14. Л. П. Котенко, Ю. С. Попов, Е. П. Кузнецов, ПТЭ, № 1, 36 (1957).
15. L. W. Alvarez, CERN Symposium 2, 13 (1956).
16. И. И. Першин, ПТЭ, № 1, 39 (1957).
17. L. O. Oswald, Rev. Sc. Instr. 28, 80 (1957).
18. J. L. Brown, C. Dodd, D. A. Glaser and M. L. Perl, CERN Symposium 2, 3 (1956).
19. D. E. Nagle, R. H. Hildebrand and R. J. Plano, Rev. Sc. Instr. 27, 203 (1956).
20. D. Parmentier and A. J. Schwemin, Rev. Sc. Instr. 26, 955 (1955).
21. R. K. Adair and L. B. Leipuner, Bull. Am. Phys. Soc. 2, № 1, 7 (1957).
22. В. З. Колганов, А. В. Лебедев, С. Я. Никитин, В. Т. Смолянкин, ПТЭ, № 1 (1958).

23. Б. Россел, Частицы больших энергий, Москва, Гостехиздат, 1955.
24. J. L. Brown, D. A. Glaser and M. L. Perl, Phys. Rev. 102, 586 (1956).
25. W. M. Fairband, E. M. Harth, M. E. Blevins and G. G. Slaughter, Phys. Rev. 100, 971 (1955).
26. E. M. Harth et al., Bull. Am. Phys. Soc. 1, № 4, 177 (1956).
27. E. M. Harth et al., CERN Symposium 2, 22 (1956).
28. Е. В. Кузнецов, М. Ф. Ломанов, Г. А. Блинов, Хуан Шэн-нянь, ЖЭТФ 31, 911 (1956).
29. Г. А. Блинов, Ю. С. Крестников, М. Ф. Ломанов, Я. Я. Шаламов, ЖЭТФ 32, 1972 (1957).
30. J. H. Mullins, E. D. Alyea, L. R. Gallagher, J. K. Chang and J. M. Teem, Bull. Am. Phys. 2, № 4, 176 (1957).
31. Фтор и его соединения, под ред. Дж. Саймонса 2, 374, Москва, ИЛ, 1956.
32. P. E. Argan and A. Gigli, Nuovo Cim. 3, 1171 (1956).
33. P. E. Argan and A. Gigli, Nuovo Cim. 4, 953 (1956).
34. F. W. Bullock, C. Dodd, C. Henderson and G. Kalmus, Nuovo Cim. 6, 334 (1957).
35. B. Hahn, Nuovo Cim. 4, 953 (1956).
36. I. A. Pless, Phys. Rev. 104, 205 (1956).
37. I. A. Pless and R. J. Plano, Rev. Sc. Instr. 27, 935 (1956).
38. P. Bassi, A. Loria, I. A. Meyer, P. Mittner and I. Scotoni, Nuovo Cim. 4, 491 (1956).
39. L. Bertanzzi, P. Franzini, G. Martelli, B. Tallini, CERN Symposium 2, 29 (1956).
40. D. A. Glaser, D. C. Rahm and C. Dodd, Phys. Rev. 102, 1653 (1956).
41. М. Ф. Ломанов, Б. В. Чириков, ИТЭ, № 5, 22 (1957).
42. C. Henderson and G. Kalmus, Nuovo Cim. 4, 925 (1957).
43. R. H. Good, Phys. Rev. 107, 1201 (1957).
44. Е. В. Кузнецов, ИТЭ, № 1, 58 (1956).
45. H. P. Hernandez, J. W. Mark and G. G. Baldwin, Rev. Sc. Instr. 28, 528 (1957).
46. J. A. Northrop, R. Nobles, Nucleonics 14, 36 (1956).
47. Е. В. Кузнецов, И. Я. Тимошин (в печати, ИТЭ).
48. P. E. Argan, A. Gigli, E. Picasso, G. Tomasini, L. Gonolla, Доклад на конференции по физике элементарных частиц высоких энергий в Венеции (1957).
49. W. J. Willis, E. S. Fowler and D. C. Rahm, Phys. Rev. 108, 1046 (1957).