

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКНОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

## ДИФФУЗИОННАЯ КАМЕРА

В. К. Ляпидевский

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Физические процессы в диффузионной камере . . . . .	112
а) Влияние конденсации . . . . .	113
б) Температурное распределение и распределение парциальных давлений . . . . .	114
2. Ионная нагрузка и время нечувствительности . . . . .	118
3. Направление диффузии . . . . .	119
4. Подобные камеры . . . . .	120
5. Камеры низкого давления . . . . .	121
6. Особенности управления . . . . .	122
7. Конструктивные особенности диффузионной камеры . . . . .	123
а) Охлаждение дна камеры . . . . .	123
б) Стенки камеры . . . . .	124
в) Источник пара . . . . .	125
г) Освещение объема камеры . . . . .	126
д) Применение пластин в диффузионной камере . . . . .	127
8. Заключение . . . . .	128

Метод регистрации ионизирующих частиц с помощью конденсации капель на ионах является одним из основных в экспериментальной ядерной физике. В основе метода лежит тот факт, что рост капель до видимых размеров на заряженных центрах происходит при меньшем пересыщении, чем на нейтральных. В хорошо известной камере Вильсона пересыщение, необходимое для конденсации капель на ионах, достигается путем адиабатического расширения смеси газа и пара.

Камера Вильсона обладает рядом недостатков, ограничивающих возможности метода. Основными из них являются: большое время нечувствительности после расширения, сложность конструкции, чувствительность к загрязнению незаряженными центрами конденсации. Последнее существенно усложняет наладку и эксплуатацию камеры с расширением. Большое время нечувствительности после расширения затрудняет использование камеры Вильсона совместно с ускорителями.

Потребность в приборе, свободном от недостатков, свойственных камере Вильсона, привела к поискам методов создания пересыщения, отличающихся от метода адиабатического расширения. В ряде работ были предприняты попытки создания камеры с непрерывной чувствительностью.

В работе <sup>1</sup> описывается камера, в которой пересыщение достигается в процессе встречной диффузии паров воды и соляной кислоты. Однако удовлетворительных результатов с такой камерой получено не было. В работе <sup>2</sup> сообщается о построении так называемой диффузионной камеры, в которой пересыщение возникает в процессе диффузии пара через конденсирующийся газ от нагреваемой горизонтальной поверхности к охлаждаемой.

Первые удовлетворительные фотографии следов частиц были получены в диффузионной камере только в 1951—1952 гг. С тех пор число работ, выполненных с помощью диффузионной камеры, а также посвященных исследованию физических процессов, протекающих в ней, непрерывно растет. Повышенный интерес к диффузионной камере объясняется тем, что она не только в значительной мере свободна от недостатков, присущих камере Вильсона, но и обладает рядом особенностей, позволяющих расширить область применения этого метода регистрации частиц.

### 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ДИФУЗИОННОЙ КАМЕРЕ

Диффузионная камера представляет собой замкнутый сосуд, заполненный смесью пара и газа (см. рис. 1). Вблизи верхней и нижней поверхностей имеются источники пара.

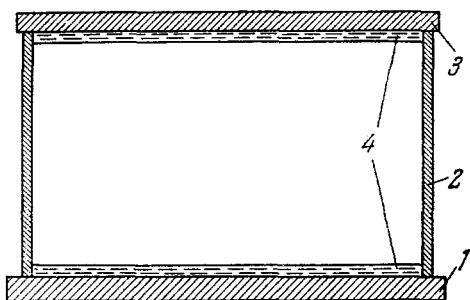


Рис. 1. Схема камеры. 1—дно, 2—стенки, 3—крышка, 4—рабочая жидкость.

Если температура  $T_1$  верхней крышки камеры не равна температуре  $T_2$  ее нижней крышки, то в объеме камеры будут протекать следующие процессы:

- 1) изотермическая диффузия пара через газ от нагреваемой поверхности к охлаждаемой;
- 2) теплопередача через смесь газа и пара;
- 3) образование и диффузия нейтральных и заряженных центров конденсации;

4) конденсация пара и рост капель на нейтральных и заряженных центрах;

5) движение капель в поле тяжести;

6) в ряде случаев в объеме камеры конвекция.

Полной теории диффузионной камеры ввиду сложности протекающих в ней процессов не существует. Все авторы при построении теории делают ряд более или менее произвольных допущений.

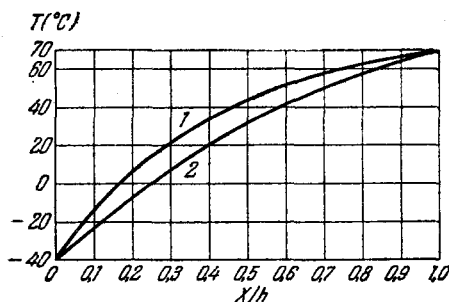


Рис. 2. Вычисленные распределения температуры в объеме камеры без конденсации, наполненной  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_3\text{OH}$ .  
Кривая 1— $6,86 \cdot 10^{-6} \text{ г/см}^2\text{сек}$ ;  
кривая 2— $2,56 \cdot 10^{-6} \text{ г/см}^2\text{сек}$ .

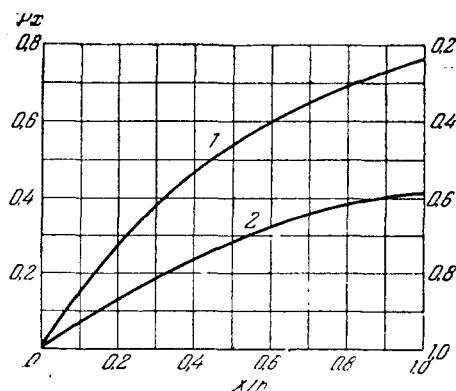


Рис. 3. Вычисленные распределения парциальных давлений (для тех же условий, что и на рис. 2).

В работе Амелина<sup>3</sup> предполагается, что поле температур и поле парциальных давлений в объеме камеры определяются одномерными

уравнениями изотермической диффузии и теплопроводности. Другие процессы не учитываются. В этих предположениях распределение температуры и парциальных давлений линейно.

Несколько лучшее приближение представляет собой расчет, приводимый в работе Лангсдорфа<sup>4</sup>, где учтена зависимость коэффициентов диффузии и теплопроводности от температуры. На рис. 2 и 3 представлены кривые температурного распределения и кривые парциального давления для двух различных потоков пара при условии, что конденсация в объеме камеры не происходит. Увеличение потока пара вызывает рост нелинейности температурного распределения и увеличивает парциальное давление в объеме камеры. На рис. 4 соответственно приведены кривые пересыщения. Штрих-пунктирные линии соответствуют пересыщению  $S_1$ , при котором начинается рост капель на ионах, и пересыщению  $S_2$ , при котором образуется большое число капель на незаряженных центрах.

Как видно из рисунка, пересыщение вблизи дна камеры превышает  $S_1$  и  $S_2$ . Граница чувствительного слоя определяется пересечением кривой  $S_x$  с кривой  $S_1$  (точки A и B на кривой 2). При увеличении потока пара возрастает парциальное давление и в соответствии с этим пересыщение (кривая 1). Очевидно, что в результате конденсации на заряженных и незаряженных центрах истинное пересыщение в диффузионной камере будет существенно меньше, чем показано на рис. 4.

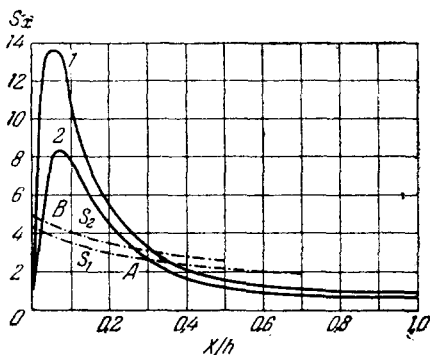


Рис. 4. Распределение пересыщений в объеме камеры. Кривая  $S_2$ —граница образования тумана, кривая  $S_1$ —граница конденсации на ионах; A и B—верхняя и нижняя границы чувствительного слоя.

#### а) Влияние конденсации

Конденсация в объеме камеры приводит к уменьшению парциального давления. Кроме того, благодаря выделению большого количества тепла при конденсации может существенно измениться распределение температуры.

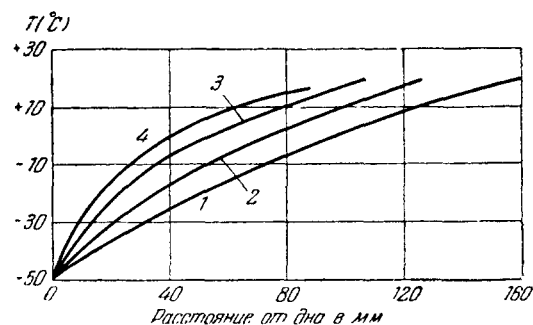


Рис. 5. Влияние конденсации на распределение температуры. Кривая 1 соответствует температурному распределению в отсутствие конденсации. Кривые 2, 3, 4 определяют температурное распределение, когда число ионов, проходящих через  $1 \text{ см}^2$  поперечного сечения в 1 сек, равно 20, 60 и 180 соответственно.

Суччи и Тальяферри<sup>5</sup> развили теорию Лангсдорфа и методом последовательных приближений оценили влияние конденсации на температурное распределение и распределение пересыщений. На рис. 5 приведены кривые распределения температуры для различных условий конденсации. Видно, что при увеличении числа центров конденсации температурное распределение изменяется, причем в каждом сечении температура повышается

8 УФН, т. LXVI, вып. 1

При больших ионных нагрузках температура повышается на  $5-20^\circ\text{C}$ . Дальнейшее развитие теории Лангсдорфа получила в работах А. Аргана и др. <sup>6</sup>. Их результаты качественно не отличаются от результатов предыдущих авторов.

Экспериментально влияние конденсации на распределение температуры изучалось в работах <sup>7, 8, 9</sup>. С этой целью температурное распределение в действующей камере сравнивалось с температурным распределением в той же камере, но без конденсации в ее объеме (в этом случае источник пара отсутствовал). Камера со стационарно закрепленными в ее объеме термопарами наполнялась воздухом и другими газами, причем общее давление, поток пара и число заряженных центров конденсации могли меняться в широких пределах. Было установлено, что если произведе-

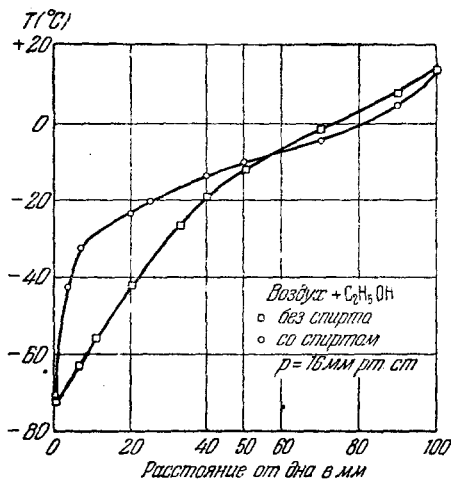


Рис. 6. Влияние конденсации на распределение температуры.

ние чисел Грасгофа ( $G_r$ ) и Прандтля ( $Pr$ ) не меньше чем  $10^6$ , влияние конденсации на температурное распределение пренебрежимо мало. Если же произведение  $G_r Pr \ll 10^6$ , то влияние конденсации на распределение температуры становится заметным. Как видно из рис. 6, изменение температуры при конденсации в камерах низкого давления может достигать  $20^\circ\text{C}$ .

В связи с изложенным представляется целесообразным произвести деление диффузионных камер на два типа: камеры, в которых конденсация в объеме практически не влияет на температурное распределение, и камеры, в которых влияние конденсации на температурное распределение велико. К первому типу относятся все камеры высокого давления, т. е. подавляющее большинство применяющихся в настоящее время камер.

Ко второму типу относятся камеры с очень низким давлением газа. В камерах первого типа определяющую роль в установлении температурного распределения играет конвективный теплообмен со стенками. В камерах второго типа (в дальнейшем называемых камерами низкого давления) конвективный теплообмен со стенками играет второстепенную роль. Теория Лангсдорфа <sup>4</sup> (и аналогичные теории <sup>5, 6</sup>), поскольку в ней пренебрегается влиянием конвекции, не применима к обычным камерам, но, по-видимому, может быть использована при анализе явлений в камерах низкого давления.

Далее везде речь будет идти об обычных диффузионных камерах. Некоторые особенности камер низкого давления рассмотрены отдельно.

## б) Температурное распределение и распределение парциальных давлений

Исследование температурного распределения в диффузионной камере проводилось рядом авторов <sup>7, 8, 9, 10</sup>. В работах <sup>7, 8</sup> было убедительно показано, что температурное распределение в объеме камеры практически совпадает с температурным распределением по стенкам и поэтому может регулироваться в широких пределах. На рис. 7 приведены кривые температурного распределения в объеме камеры, наполненной воздухом и

парами этилового спирта при общем давлении, равном одной атмосфере. Кривые 1 и 2 получены при омывании наружной поверхности стен камеры комнатным воздухом. Видно, что температурное распределение в объеме камеры мало отличается от распределения температуры по стенкам, причем температура стенки в каждом горизонтальном сечении несколько выше, чем температура в центре камеры. При охлаждении стен извне температурное распределение резко меняется (кривые 3 и 4). В этом случае температура стенки в каждом горизонтальном сечении камеры несколько ниже, чем в центре. Характер кривых горизонтального распределения температуры в камере, омываемой комнатным и охлажденным воздухом, показан на рис. 8 и рис. 9 соответственно.

Около нагреваемых снаружи комнатным воздухом стенок газ внутри камеры движется снизу вверх. При охлаждении стенок извне поток газа меняет направление на обратное. Очевидно, что существует промежуточный режим работы камеры, когда распределение температуры по стенке совпадает с распределением температуры в газе и конвекция отсутствует. Однако легко видеть, что такой режим работы камеры не будет устойчивым. Действительно, достаточно изменить число центров конденсации в объеме камеры (например, после прохождения ионизирующей частицы), как это немедленно повлечет за собой выделение тепла в ее объеме, что приведет к появлению конвекционных токов. Поэтому в реальной камере, как правило, существует конвекция.

При изменении температурного распределения по стенкам, а также при изменении условий конденсации в объеме камеры изменяется скорость, а в некоторых случаях и направление конвекционных токов. Экспериментальное исследование, описанное в работе<sup>8</sup>, показало, что конвекция в объеме камеры имеет осевую симметрию и не приводит к неоднородности пересыщения в чувствительном слое, если вблизи стенок газ движется по направлению снизу вверх. Скорость движения газа в рабочем объеме камеры сравнима со скоростью падения капель. Поэтому движение газа не вызывает заметного искажения следа частицы за время, необходимое для его регистрации. Это означает, что температурное распределение в объеме камеры можно регулировать без нарушения ее работы.

Конвективное движение газа в объеме камеры оказывает существенное влияние на распределение парциальных давлений. Поле парциальных давлений в объеме действующей камеры исследовалось двумя методами: по поглощению смесью газа и пара ультрафиолетового излучения<sup>11</sup> и методом расширений<sup>12</sup>. Первый метод основан на измерении оптической плотности смеси газа и пара в различных сечениях камеры. Во втором методе регистрируется степень расширения, при которой в определенной области диффузионной камеры образуется туман и, следовательно, пересыщение

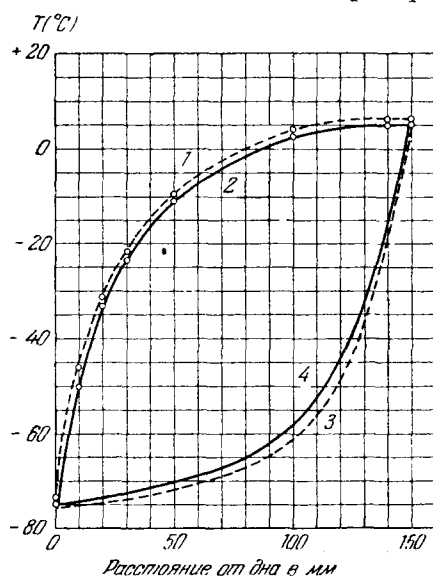


Рис. 7. Кривые температурного распределения по стенкам (пунктирные кривые 1 и 3) и в объеме камеры (кривые 2 и 4). Кривые 1 и 2 получены в камере со стеклянными стенками, омываемыми комнатным воздухом; кривые 3 и 4 получены в той же камере при охлаждении стенок.

превышает  $S_2$ . Как правило, верхняя граница тумана представляет собой поверхность, близкую к плоскости параллельной диффузионной камере.

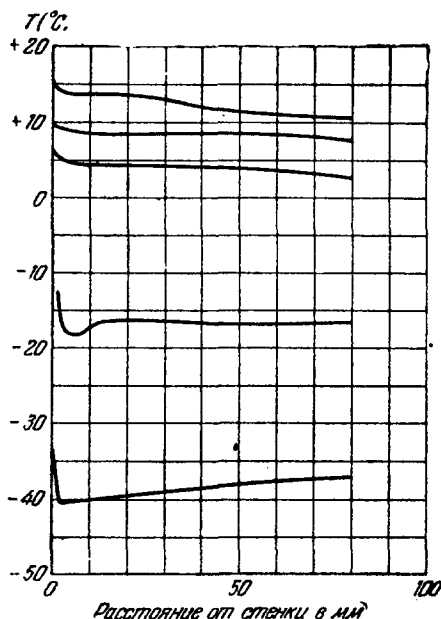


Рис. 8. Горизонтальное распределение температуры в камере, омываемой комнатным воздухом.

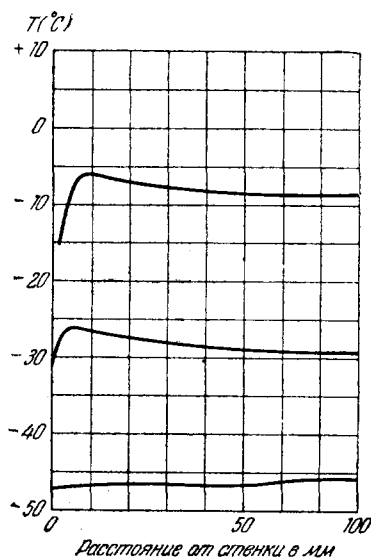


Рис. 9. Горизонтальное распределение температуры в камере с охлаждаемыми стенками.

На рис. 10 приведено вертикальное сечение слоя тумана, образовавшегося после расширения. Вблизи стенок имеется зона с меньшим пересыщением. В верхних сечениях камеры на распределение парциальных давлений некоторое влияние оказывает конструкция источника пара. Зная расстояние верхней границы тумана от дна  $h_1$ , температуру  $T_{h_1}$  после расширения и величину пересыщения  $S_2$  для данной смеси газа и пара, можно определить парциальное давление  $P_{h_1}$  на этой границе:

$$P_{h_1} = S_2 P_n(T_{h_1}).$$

Изменяя степень расширения, можно определить таким путем парциальное давление во всем объеме камеры.

На рис. 11 приведена типичная кривая распределения парциальных давлений в камере с нелинейным распределением температуры. В верхних сечениях (выше зоны конденсации) парциальное давление

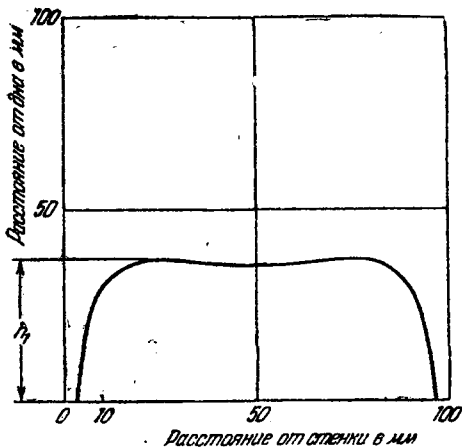


Рис. 10. Вертикальное сечение слоя тумана, образовавшегося после расширения.

мало меняется с высотой, что обусловлено интенсивным перемешиванием смеси газа и пара.

При изменении температурного распределения (если при этом не изменяется направление конвекционных токов) характер кривой парциа-

льных давлений не изменяется, причем парциальное давление выше зоны конденсации также остается неизменным. Вместе с тем при изменении температурного распределения происходит изменение пересыщения в соответствии с изменением давления насыщенных паров. Это в свою очередь приводит к изменению величины зоны конденсации. Так, например, при изменении температурного распределения, как показано на рис. 12, высота чувствительного слоя изменяется от 1,8 см (кривая 1) до 5,5 см (кривая 3).

Следует отметить, что диффузионная камера благодаря действию механизма саморегулирования пересыщения может работать в очень большом диапазоне температурных распределений. Если температурное распределение выбрано так, что пересыщение в объеме камеры в какой-то момент времени значительно превышает  $S_2$  (например, как на кривой 1 рис. 4), то в чувствительном слое начинается самопроизвольная конденсация пара на незаряженных центрах. Пересыщение падает. Это приводит к уменьшению числа активных центров конденсации и уменьшению скорости роста капель. При этом расход пара уменьшается и пересыщение растет.

Вследствие этого механизма пересыщение в чувствительном слое действующей камеры не может длительное время существенно превышать  $S_2$  или быть значительно меньше этого значения. Изменение температурного распределения в этом случае приводит в основном к изменению величины капельного фона.

В ряде случаев процесс саморегулирования носит ясно выраженный пульсирующий характер. В чувствительном слое возникают периодические изменения плотности туманного фона. Этот эффект может быть значительно уменьшен или совершенно устранен путем соответствующего изменения температурного распределения.

Регулирование режима работы камеры можно осуществлять также, изменяя величину потока пара путем увеличения поверхности источника пара или его температуры. (Поток пара может быть определен, например, путем измерения количества испарившейся за определенный промежуток времени рабочей жидкости<sup>9</sup>.)

При увеличении потока парциальное давление пара в каждом сечении должно возрастать. Но в чувствительном слое пересыщение не может значительно превышать  $S_2$ . Поэтому избыток пара выделяется в виде жидкой фазы. Таким образом, увеличение потока пара приводит к возрастанию капельного фона и мало влияет на величину пересыщения в чувствительном слое.

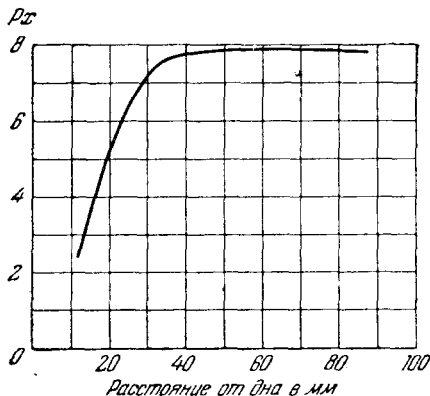


Рис. 11. Распределение парциальных давлений в камере с нелинейным распределением температуры.

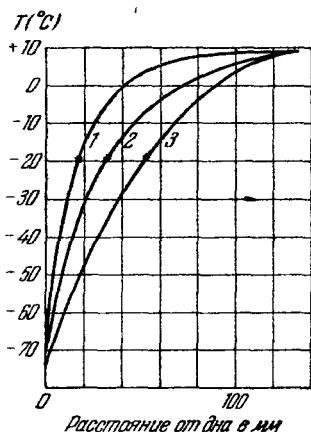


Рис. 12. Температурные распределения в объеме камеры. Звездочкой на каждой кривой указана температура, соответствующая верхней границе чувствительного слоя.

Изменение температурного распределения и величины потока пара влияет также на основные эксплуатационные характеристики камеры: максимальную ионную нагрузку, при которой камера может работать непрерывно, и время нечувствительности после импульсного облучения.

## 2. ИОННАЯ НАГРУЗКА И ВРЕМЯ НЕЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

В отличие от камеры Вильсона диффузионная камера обладает непрерывной чувствительностью. Если число ионов, возникающих в  $1 \text{ см}^3$  камеры в одну секунду (ионная нагрузка), не превышает определенной величины, камера способна зарегистрировать все события, сопровождающиеся ионизацией газа в ее объеме. С помощью диффузионной камеры можно, например, определять активность слабых препаратов путем подсчета числа следов частиц за определенный промежуток времени. Образовавшийся след падает на дно в течение нескольких секунд, в зависимости от места его образования и величины капель.

Непрерывная чувствительность и большое время существования следа приводят к тому, что на фотографиях, полученных с помощью диффузионных камер, всегда присутствует некоторое количество фоновых следов. Фоновые следы не только мешают проводить анализ фотографий, но и уменьшают пересыщение, которое при больших ионных нагрузках может упасть ниже значения  $S_1$ . Поэтому необходима экранировка объема камеры от внешнего облучения. По этим же причинам рабочая смесь, наполняющая камеру, не должна быть радиоактивной.

При малых градиентах температуры в чувствительном слое камера перестает работать при интенсивностях излучения, сравнимых с естественным фоном. Из рис. 12 видно, что уменьшение температурного градиента связано с увеличением высоты чувствительного слоя  $h$ . При увеличении  $h$  число центров конденсации в нижних сечениях камеры возрастает за счет капель, падающих сверху. Вблизи дна пересыщение падает, что приводит к образованию зоны нечувствительности. Поэтому обычно величина чувствительного слоя в диффузионной камере не превышает 6—7 см. При уменьшении высоты чувствительного слоя и увеличении градиента температуры предельная ионная нагрузка растет.

Заметное влияние на величину допустимой ионной нагрузки оказывает также поток пара. Так, например, в камере, заполненной воздухом и парами этилового спирта при атмосферном давлении, увеличение потока пара в шесть раз приводит к увеличению предельно допустимой ионной нагрузки в три раза. Количество пара, конденсирующегося на незаряженных центрах, при увеличении ионной нагрузки уменьшается, что приводит к уменьшению капельного фона. Общее количество жидкости, конденсируемой в объеме камеры в единицу времени, по-видимому, остается практически постоянным.

В некоторых режимах работы камера может непрерывно регистрировать излучение при фоне, превышающем в сотни раз фон космического излучения<sup>13</sup>. Большую роль в этих режимах играют конвекционные токи, осуществляющие перенос смеси газа и пара от нагреваемой поверхности к охлаждаемому дну.

После прохождения заряженной частицы через чувствительный слой в нем возникает область с пересыщением, меньшим  $S_1$ , имеющая форму цилиндра, диаметр которого зависит от ионизирующей способности частицы и количества пара в данном сечении. Время восстановления пересыщения после прохождения одиночной частицы равно нескольким секундам. При большом числе частиц некоторые из них пересекают области, в которых пересыщение не успело восстановиться, и образуют прерывистые сле-



ды. Если и через чувствительный слой проходит пучок, состоящий из большого числа частиц, пересыщение может упасть существенно ниже величины  $S_1$ ; при этом полное время восстановления пересыщения возрастает до 10—15 сек. Чем большее число ионов одновременно образуется в чувствительном слое, тем ниже падает пересыщение и тем больше время восстановления. При увеличении высоты чувствительного слоя время нечувствительности растет. Время восстановления может быть сокращено путем увеличения потока пара<sup>14</sup>.

При облучении всего объема камеры центры конденсации возникают не только в чувствительном слое, но и в вышележащих сечениях. Перемещаясь в объеме камеры и достигая верхней границы чувствительного слоя, эти центры конденсации образуют более или менее равномерный капельный фон. При большой концентрации ионов возможно падение пересыщения в чувствительном слое камеры ниже величины  $S_1$ . Время нечувствительности после прекращения облучения зависит от природы пара. Это указывает на то, что, по-видимому, центрами конденсации являются не ионы, а заряженные капли, диффундирующие в чувствительный слой из вышележащих сечений.

Заряженные центры конденсации могут быть убраны из объема камеры, расположенного выше чувствительного слоя, с помощью электрического поля, создаваемого между крышкой, служащей одним электродом, и вторым электродом, расположенным вблизи верхней границы чувствительного слоя.

При загрязнении незаряженными центрами конденсации очищение объема камеры происходит в результате переноса этих центров в чувствительный слой с последующим падением образовавшихся капель на дно. При очень большом числе центров скорость их убирания ограничена потоком пара. При небольшом числе, когда расход пара на конденсацию капель меньше потока пара, время нечувствительности определяется скоростью переноса центров в чувствительный слой. Поэтому время нечувствительности сильно зависит от характера движения газа в объеме камеры и от ее конструктивных особенностей. Камера простой конфигурации с резко нелинейным температурным распределением после заполнения ее неочищенным комнатным воздухом имеет время нечувствительности порядка двух минут. При спрямлении кривой температурного распределения скорость конвекции уменьшается и время нечувствительности растет, достигая в ряде случаев 20 и более минут.

Существенно отметить, что, если в камере нет постоянно действующих источников центров конденсации, ее объем более или менее быстро самоочищается. Эта способность диффузионной камеры отчетливо характеризует ее эксплуатационные качества и выявляет одно из основных преимуществ диффузионной камеры по сравнению с камерой Вильсона.

### 3. НАПРАВЛЕНИЕ ДИФфуЗИИ

В диффузионной камере плотность непостоянна по высоте и является функцией как температуры, так и процентного состава смеси газа и пара. В том случае, когда молекулярный вес газа меньше молекулярного веса пара, это может привести к тому, что плотность смеси будет уменьшаться по направлению сверху вниз и в камере возникнет особый вид конвекции. Между крышкой и дном образуется система вертикальных конвекционных токов. Этот эффект возникает в основном в камерах низкого давления, где парциальное давление пара соизмеримо с общим давлением.

Конвекцию можно устранить, если изменить направление диффузии на обратное. Камеры с нагреваемым дном и охлаждаемой крышкой

(направление диффузии снизу вверх) описаны в <sup>15, 16, 17</sup>. Данные по исследованию работы таких камер приведены в <sup>8, 18</sup>.

При больших давлениях газа, когда давление паров пренебрежимо мало по сравнению с общим давлением, изменение состава смеси в процентном отношении невелико и изменение плотности с высотой обусловлено в основном температурным фактором. Увеличение давления газа либо уменьшение парциального давления пара способствует стабилизации газа в камере с направлением диффузии сверху вниз. Точно так же действует увеличение молекулярного веса газа или уменьшение молекулярного веса пара. Известно, что камеры, наполненные водородом или гелием, могут работать стабильно, только если общее давление смеси превышает несколько атмосфер <sup>19</sup> (температура источника пара  $+10^\circ\text{C}$  ÷  $+15^\circ\text{C}$ ). При понижении температуры верхней крышки парциальное давление пара резко снижается, что позволяет работать с легкими газами при давлении, меньшем атмосферного <sup>20</sup>. Очевидно, что для сохранения необходимого распределения температуры в объеме камеры в последнем случае следует понижать температуру дна.

#### 4. ПОДОБНЫЕ КАМЕРЫ

Наибольшее распространение получили камеры высокого давления. В камерах такого типа, как упоминалось, распределение температуры можно регулировать в широких пределах и тем самым регулировать величину пересыщения. Результаты, полученные на одной камере, могут быть применены к другой камере подобного типа. При наладке камера обычно наполняется воздухом при атмосферном давлении, и затем опытным путем устанавливается оптимальное температурное распределение в ее объеме. Установленный режим будет оптимальным и для других газов и давлений (если  $\text{Gr Pr} > 10^6$  во всех случаях). Для камер с одинаковым температурным распределением величина предельной ионной нагрузки и время нечувствительности будут зависеть от природы газа, давления в камере и величины потока пара.

Шатт установил, что ионная нагрузка и давление связаны с параметрами газа следующим соотношением <sup>21</sup>:

$$B = \mu_0 D_0^{-\frac{1}{3}} p^{\frac{1}{3}} (n_0 a Z p)^{\frac{4}{3}},$$

где  $B$  — постоянная величина для данного распределения температуры,  $\mu_0$  — кинематическая вязкость при  $273^\circ\text{C}$  и нормальном давлении,  $D_0$  — коэффициент диффузии пара в газе при нормальном давлении и температуре  $273^\circ\text{C}$ ,  $n_0$  — число ионов, образующихся в  $1\text{ см}^3$  воздуха в  $1\text{ сек}$  при давлении в одну атмосферу,  $a$  — число атомов в молекуле газа,  $Z$  — атомный номер газа.

Теория Шатта не учитывает влияния нейтральных центров конденсации. Вводя соответствующую поправку, Бивен получил формулу, учитывающую как нейтральные, так и заряженные центры конденсации <sup>22</sup>:

$$B_a = \mu_0 D_0^{-\frac{1}{3}} p^{\frac{1}{3}} [n_0 a Z p + 14,5 e^{0,116t}]^{\frac{4}{3}},$$

где  $t$  — наивысшая температура в объеме камеры в градусах Цельсия (обычно температура источника пара).

Приведенные соотношения подвергались экспериментальной проверке в работах <sup>8, 9, 14</sup>. Было установлено, что при замене одного газа другим и при изменении давления соотношение между  $\mu_0$ ,  $D_0$ ,  $a$ ,  $Z$ , максимальной ионной нагрузкой и давлением хорошо описывается формулой Шатта.

Теория Шатта не учитывает влияния величины потока пара на работу камеры. В действительности же, как было показано в работах <sup>8, 14</sup>, это влияние существенно. Изменяя поток пара (путем развития поверхности источника пара), можно увеличить предельную ионную нагрузку в несколько раз и существенно сократить время нечувствительности.

В формуле Бивена не учтен тот факт, что с увеличением температуры источника пара вместе с увеличением числа нейтральных центров увеличивается и поток пара. Поэтому эксперимент не подтверждает формулу Бивена. Так, например, при увеличении температуры источника предельная ионная нагрузка в ряде случаев не уменьшается (как следует из формулы Бивена), а растет <sup>8</sup>.

Согласно Шатту <sup>21</sup>, имеется минимальный градиент температуры, при котором камера в данных условиях может работать. Бивен опытным путем определил соотношение между минимальным температурным градиентом  $G$  в чувствительном слое и параметром  $B$  <sup>22</sup>. Однако его результаты, по-видимому, имеют ограниченное применение, так как параметр  $B$  зависит не только от градиента температуры в чувствительном слое, но и от распределения температуры в объеме камеры. Для камер различной конструкции при одинаковом градиенте температуры в чувствительном слое распределение температуры в объеме может заметно отличаться одно от другого. По-видимому, этим и объясняется тот факт, что измерения, проведенные с камерами другой конструкции, дают зависимость  $G$  от  $B$ , отличающуюся от приводимой Бивеном <sup>8</sup>.

## 5. КАМЕРЫ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Камеры низкого давления описаны в работах <sup>20, 23</sup>. Температурное распределение в газе камеры низкого давления мало зависит от температурного распределения по стенкам<sup>9</sup> и поэтому не может регулироваться, как в камерах высокого давления.

При уменьшении давления температура в нижних сечениях работающей камеры может как повыситься, так и понизиться, в зависимости от характера температурного распределения при высоком давлении. Уменьшение давления в камере с резко нелинейным распределением температуры (и, следовательно, малой высотой чувствительного слоя) понижает температуру в ее объеме. Наоборот, в камере с температурным распределением, близким к линейному, при понижении давления температура в зоне конденсации возрастает. В обоих случаях при понижении давления газа наблюдается уменьшение высоты чувствительного слоя.

Это явление, по-видимому, связано с уменьшением парциального давления в объеме камеры <sup>9</sup>.

В камерах с большой высотой чувствительного слоя ( $>5$  см) уменьшение слоя при понижении давления обусловлено в значительной мере повышением температуры в объеме камеры. В работе <sup>23</sup> указывается, что при уменьшении давления высота чувствительного слоя уменьшается от 100 мм при атмосферном давлении до 20 мм при давлении 30 мм рт. ст.

В камере при давлениях ниже 30 мм рт. ст. возникают периодические флуктуации плотности фона <sup>24</sup>. Чувствительный слой распадается на ячейки. Характерная фотография чувствительного слоя приведена на рис. 13. Туман оседает и вновь образуется (пульсация туманного фона), причем форма и месторасположение ячеек могут изменяться. Величина ячеек и частота пульсаций зависят от давления в камере и природы газа и пара. Частота пульсаций увеличивается при уменьшении потока пара и понижении давления газа. Чем меньше скрытая теплота конденсации

и чем меньше молекулярный вес газа, тем частота пульсации больше. Флуктуации плотности туманного фона, очевидно, связаны с выделением тепла при конденсации.

Важно отметить, что след  $\alpha$ -частицы, проходящей одновременно через несколько ячеек, непрерывен. При определенных условиях освещения

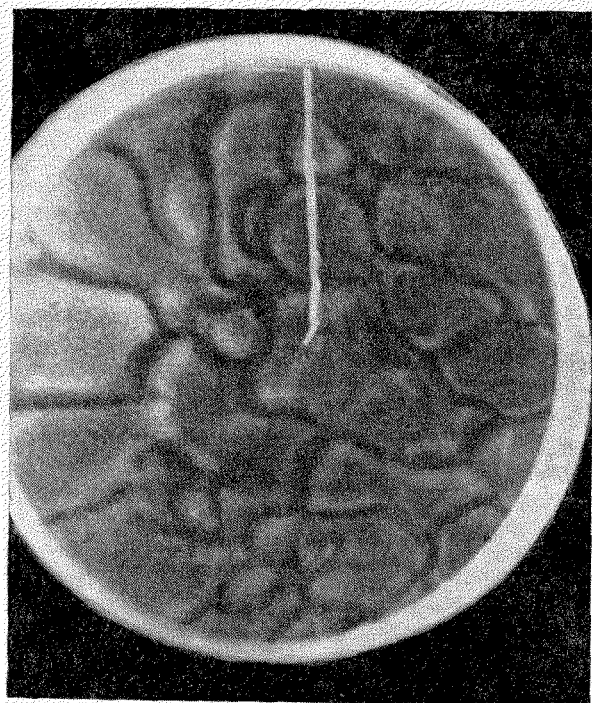


Рис. 13. Фотография чувствительного слоя в камере низкого давления ( $p=40$  мм рт. ст.), заполненной воздухом и парами этилового спирта.

ячейки могут быть незаметны на фотографии (в то время как след  $\alpha$ -частицы виден отчетливо).

Как уже отмечалось, флуктуации капельного фона при определенном температурном распределении возникают и в камерах высокого давления. Однако в отличие от камер высокого давления, где этот эффект может быть устранен, в камере низкого давления флуктуации плотности капельного фона во времени неустраняемы, так как регулирование температурного распределения в таких камерах невозможно.

## 6. ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ

Диффузионная камера может управляться как внешними, так и внутренними<sup>25</sup> счетчиками. При работе с ускорителями управление диффузионной камеры обычно осуществляется от самого ускорителя<sup>26</sup>. Последовательность операций и характерные интервалы времени между ними приведены на рис. 14, заимствованном из работы<sup>26</sup>.

В диффузионной камере рост капель на ионах начинается непосредственно после прохождения частицы, в то время как в камере Вильсона между моментом прохождения частицы и моментом образования необхо-

димого пересыщения проходит некоторый промежуток времени, в течение которого ионы диффундируют от места своего образования. Это приводит к тому, что следы частицы в диффузионной камере имеют лучшее качество, чем в управляемой от счетчиков камере Вильсона. Следует также иметь в виду, что в диффузионной камере отсутствуют искажения следов, вызываемые движением газа, связанным с процессом расширения. Сама система управления диффузионной камерой значительно проще соответствующей системы управления камерой с расширением.

Благодаря непрерывности действия можно осуществить управление диффузионной камерой с помощью фотоумножителя (ФЭУ), «просматривающего» рабочий

объем. Свет, рассеянный следом частицы, попадает в ФЭУ, и на выходе последнего появляется электрический импульс, запускающий систему управления. Необходимым условием для осуществления такого управления является требование, чтобы флуктуации света, рассеянного капельным фоном, были существенно меньше светового импульса, даваемого следом регистрируемой частицы. Такие условия легко осуществить при регистрации ливней, образуемых частицами высокой энергии, а также сильно ионизирующих частиц, например  $\alpha$ -частиц.

В краткой заметке<sup>27</sup> сообщается о возможности управления диффузионной камерой от фотоэлемента.

Управление камерой с помощью ФЭУ может оказаться перспективным, например, при регистрации широких атмосферных ливней или событий, сопровождающихся возникновением сильно ионизирующих частиц в самом объеме диффузионной камеры.

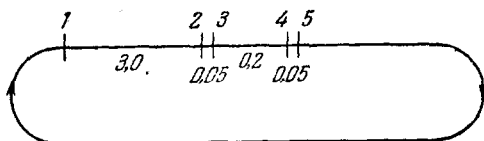


Рис. 14. Схема рабочего цикла диффузионной камеры. Приведены характерные времена в секундах. 1—выключение очищающего электрического поля, 2—3—впуск частиц, 4—импульсное освещение, 5—выключение очищающего электрического поля и механизма передвижки пленки. Полная длительность цикла 6—12 сек.

## 7. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДИФфуЗИОННОЙ КАМЕРЫ

### а) Охлаждение дна камеры

Температура дна, при которой камера работает удовлетворительно, в значительной мере определяется природой пара. Обычно в диффузионной камере применяются пары метилового и этилового спирта. Для этих паров температура дна должна быть ниже  $-40^{\circ}\text{C}$ .

Наиболее простым является способ охлаждения дна непосредственным контактом с твердой углекислотой, которая поджимается ко дну с помощью пружины. Этот метод дает вполне удовлетворительные результаты при работе с камерами, имеющими стенки из плохо проводящих материалов. В металлических камерах поток тепла по стенкам довольно велик. Например, в камере со стальными стенками толщиной 6 мм и диаметром 430 мм при градиенте температуры  $6^{\circ}\text{C}/\text{см}$  необходим поток тепла 50 кал/сек<sup>28</sup>. При этом скорость испарения твердой углекислоты достигает 1 л/сек, что приводит к образованию теплоизолирующей прослойки газа. Это в свою очередь вызывает неравномерное охлаждение дна.

Несколько лучшие результаты можно получить при охлаждении дна смесью твердой углекислоты с ацетоном или спиртом<sup>29, 14</sup>. В контейнер,

приваренный ко дну, загружается охлаждающая смесь, находящаяся в контакте с нижней поверхностью дна, что обеспечивает его более равномерное охлаждение. Однако и в этом случае выделение большого количества газа при больших потоках тепла уменьшает общую поверхность соприкосновения с охлаждающей смесью, что препятствует достижению низких температур.

Для охлаждения дна камеры до более низких температур используется жидкий азот. Дно камеры охлаждается либо с помощью теплопровода, находящегося в сосуде Дюара<sup>20</sup>, либо путем пропускания жидкого азота через змеевик, укрепленный на дне<sup>8, 12</sup>.

В диффузионных камерах, работающих совместно с ускорителями, обычно применяется охлаждающая система, состоящая из теплообменника (или холодильной машины) и змеевика, укрепленного непосредственно на дне камеры. Охлаждающая жидкость с помощью насоса прогоняется через теплообменник (обычно бак, заполненный смесью твердой углекислоты с ацетоном) и затем через змеевик, укрепленный на дне камеры. Температура может регулироваться путем изменения давления паров над смесью. Это позволяет охлаждать дно камеры до температуры порядка минус 100° С<sup>28</sup>. В работе<sup>28</sup> приведены расчеты, могущие быть полезными при проектировании циркуляционной системы охлаждения камеры.

Специфические трудности возникают при охлаждении камер с прозрачным дном. Одна из таких камер описана в<sup>30</sup>.

### б) Стенки камеры

Стенки диффузионной камеры выполняют две различные функции. Во-первых, стенки являются частью оболочки, которая в случае наполнения камеры газами при различных давлениях должна быть герметична и достаточно прочна. Во-вторых, стенки камеры задают граничные температуры и, следовательно, существенным образом влияют на распределение температуры в объеме камеры.

Для того чтобы в объеме камеры отсутствовали местные конвекционные токи, нарушающие ее нормальную работу, температура стенки в любом горизонтальном сечении должна быть постоянна. В камерах со стенками из прозрачных материалов, где не требуется окон для освещения, это условие легко может быть выполнено. В отличие от камер со сплошными стенками металлические камеры должны иметь окна для освещения и впуска частиц. В таких камерах поток тепла по стенке от крышки ко дну в различных сечениях встречает на своем пути различные сопротивления. Это приводит к тому, что вертикальное распределение температуры по стенке в различных сечениях различно. Существование горизонтальной составляющей температурного градиента приводит к возникновению конвекционных токов, которые легко обнаружить по образованию полос тумана, длительное время не меняющих своего месторасположения. В результате конвекции в объеме камеры устанавливается промежуточное температурное распределение, отличающееся от температурного распределения по стенкам.

С целью устранения разности температур в любом горизонтальном сечении камеры можно использовать источники холода и тепла, размещая их с внешней стороны стенок. Значительно проще, однако, для задания поля температур помещать внутрь камеры специальную оболочку<sup>8, 14, 31</sup>. С этой целью внутри металлической камеры помещается цилиндр из прозрачного материала с основанием из красной меди. Температура на нижней границе плексигласового цилиндра задается температурой медного диска, а на верхней — температурой медного желоба, содержащего испаряющую-

ся жидкость. С внешней стороны цилиндр омывается газом, осуществляющим перенос тепла между различными элементами камеры. Измерения, выполненные с помощью скользящей по стенке цилиндра термопары<sup>8</sup>, показали, что горизонтальная составляющая температурного градиента не превышает  $1-2^{\circ}\text{C}$ .

Трудности, связанные с необходимостью выравнивания температуры по стенкам металлической камеры с окнами, могут быть в значительной степени преодолены, если освещение осуществлять через окно в верхней крышке с помощью зеркал, помещенных в объеме камеры<sup>8</sup>. В этом случае окна в боковых стенках отсутствуют. Наличие окон в боковых стенках нежелательно также и по соображениям прочности. В области больших градиентов температур в сочлененных деталях, выполненных из материалов с различными коэффициентами расширения, возникают внутренние напряжения. Это особенно опасно в камерах высокого давления, где возможно возникновение течи из-за нарушения уплотнения в результате многократной деформации в процессе охлаждения и нагревания камеры. Устранение течи и устройства, уменьшающие возможность ее образования в камерах с окнами, усложняют эксплуатацию прибора<sup>14</sup>.

#### в) Источник пара

В качестве источника пара в камерах с направлением диффузии сверху вниз обычно применяются желоба, крепящиеся в верхней крышке, в которые наливается рабочая жидкость. Вблизи крышки упругость пара уменьшается по мере удаления от желоба. Для получения вблизи верхней крышки однородного пересыщения, равного единице, в качестве источника пара можно использовать жидкость, поддерживаемую при постоянной температуре<sup>8</sup> и испаряющуюся с нижней поверхности. В этом случае крышка представляет собой сосуд с газонепроницаемыми стенками и дном в виде пористой перегородки. Более простая конструкция испарителя описана ранее<sup>17</sup>. К нижней поверхности металлической крышки прикреплялась хорошо смачиваемая ткань. Для поддержания влажности на постоянном уровне применялась система питающих труб.

Источники пара в виде желоба обладают двумя существенными недостатками. Во-первых, они требуют периодического пополнения рабочей жидкости. В больших камерах, работающих при повышенном или пониженном давлении газа, для пополнения рабочей жидкости необходимы специальные устройства<sup>14</sup>, что усложняет конструкцию камеры и ее эксплуатацию. Во-вторых, в случае применения в качестве источника пара смеси различных жидкостей в процессе работы происходит изменение состава смеси, а следовательно, и изменение условий работы камеры. Поэтому в диффузионных камерах обычно применяются чистые спирты. Известно, однако, что смеси дают лучшие результаты. Если камера имеет несколько не сообщающихся между собой желобов, то возможно, используя несколько чистых жидкостей, работать со смесью паров. Однако в этом случае недостаток, связанный с необходимостью использования специальных устройств для пополнения рабочих жидкостей, усугубляется.

В 1952 г. была предложена диффузионная камера с непрерывно действующим источником пара<sup>32</sup>, не имеющая указанных недостатков. Рабочая жидкость, наливаемая на дно камеры, поднимается под действием капиллярных сил по пористым пластинкам, расположенным вблизи стен, и затем, испаряясь, диффундирует в объем камеры. Этот процесс происходит непрерывно, пока поддерживается необходимая

разность температур между крышкой и дном. В процессе работы состав смеси остается постоянным. Исследование структуры чувствительного слоя с помощью газового разряда<sup>8</sup>, а также методом расширения<sup>12</sup> в камере с непрерывно действующим источником пара<sup>33</sup> показывает, что пересыщение в чувствительном слое мало зависит от горизонтальной координаты. Распределение парциальных давлений в объеме камеры с непрерывно действующим источником пара имеет такой же характер, как в камере с обычно применяемым источником пара в виде желоба. Окна, прорезанные в пористых пластинках для освещения объема камеры, не вызывают неоднородности чувствительного слоя.

В камере с непрерывно действующим источником пара капельный фон, как правило, имеет меньшую плотность и более однороден, чем в камере с источником пара в виде желоба, находящегося вблизи верхней крышки. Это, по-видимому, связано с тем обстоятельством, что вблизи источника пара, имеющего вид желоба, крепящегося к верхней крышке, при определенных условиях возможно образование большого числа центров конденсации.

Обычно в камерах с желобом температура источника пара на несколько градусов выше температуры омывающего его газа. Эта разность температур особенно велика в камерах, где осуществляется дополнительный подогрев источника пара, как, например, в<sup>22</sup>. При омывании такого источника газом, поступающим из нижних сечений, возникающие центры конденсации переносятся в чувствительный слой, образуя туманный фон.

В случае неравномерного нагрева крышки или стен камеры в ее объеме возникают местные конвекционные токи, в результате чего капельный фон приобретает соответствующую структуру. Токи охлажденного газа, имеющие направление сверху вниз, попадая в чувствительный слой, образуют туманные полосы, почти не меняющие своей формы и месторасположения в течение длительного времени. Возникновение таких туманных полос отмечалось многими авторами<sup>28</sup>. В тех случаях, когда источник пара имеет более низкую температуру, чем газ вблизи верхней крышки (как, например, при непрерывно действующем источнике), это явление выражено в значительно меньшей степени.

Непрерывно действующий источник пара может применяться и в камерах больших размеров (как, например, в камере с площадью дна  $60 \times 90$  см<sup>2</sup>, демонстрировавшейся на Всесоюзной промышленной выставке 1956 г.).

Как уже упоминалось, при повышении температуры источника пара растет число нейтральных центров и, следовательно, капельный фон. По-видимому, при температурах в объеме камеры, превышающих 60° С, получить следы ионизирующих частиц удовлетворительного качества не представляется возможным. При температурах порядка 80° С камера вообще перестает регистрировать излучение.

### г) Освещение объема камеры

Объем камеры обычно освещается сбоку через прозрачные стенки или, если камера металлическая, через окна в стенках.

Для предохранения от обмерзания или запотевания наружной поверхности окон, проделанных в боковых стенках, применяются воздушные теплоизолирующие прослойки<sup>34, 35</sup>. При этом температура внешних поверхностей, омываемых комнатным воздухом, обычно выше точки росы. В некоторых случаях для предотвращения конденсации внешние стенки обогреваются. Для предотвращения запотевания внешней поверхности



окон в металлических камерах обычно применяются специальные кожухи, изолирующие окна от комнатного воздуха <sup>14</sup>. Воздух в объеме кожуха осушается. Внутри кожуха монтируется осветительная лампа с системой линз.

Световой поток, вообще говоря, взаимодействует со смесью газа и пара в объеме камеры. Это может в ряде случаев привести к увеличению капельного фона, ухудшению качества следов и уменьшению предельно допустимой ионной нагрузки. При освещении камеры газоразрядными лампами в ее объеме могут возникнуть нейтральные центры конденсации <sup>14</sup>. Благодаря большому времени жизни нейтральные центры способны накапливаться в объеме камеры. В результате этого процесса капельный фон в камере растет с течением времени и при длительной непрерывной работе может стать настолько большим, что регистрация ионизующих частиц будет затруднена. В некоторых случаях нефильТРованное освещение объема камеры с помощью импульсных ламп может привести к длительному нарушению ее нормальной работы и к полной потере чувствительности.

Другое действие света заключается в нагревании стен камеры, что приводит к изменению температурного распределения. При равномерном освещении объема камеры и предотвращения нагревания стен длительное непрерывное освещение от ламп накаливания не вызывает заметных нарушений ее работы. Например, камера для проекции следов ионизующих частиц на экран работает непрерывно при световом потоке 2000 лм <sup>30</sup>.

#### д) Применение пластин в диффузионной камере

При исследовании взаимодействия частиц высокой энергии с веществом в ряде случаев желательно помещение в рабочий объем камеры поглощающих пластин. Помещение твердого тела в объем диффузионной камеры и связанное с этим изменение условий переноса тепла и вещества могут существенно изменить режим работы камеры.

Помещение в объеме камеры пластины малой толщины из плохо теплопроводящих материалов мало влияет на температурное распределение в объеме камеры. (Температурное распределение по пластинке будет задаваться температурным распределением в газе камеры.) Аналогичные условия возникают при использовании составных пластин, термически изолированных друг от друга. Например, в работе <sup>36</sup> было показано, что изготовленный таким образом свинцовый фильтр не нарушает теплового режима камеры.

При использовании открытых пластин, выполненных из материалов с хорошей теплопроводностью, температурное распределение по пластинке необходимо задавать принудительно путем соответствующего размещения источников холода и тепла. В этом случае влияние пластинки на температурное распределение в объеме камеры существенно.

У поверхности твердого тела пересыщение не может быть больше 1, поэтому вблизи пластинки, помещенной в объеме камеры, возникает зона нечувствительности. Это обстоятельство является основным препятствием, ограничивающим применение диффузионных камер с пластинками.

В работе <sup>37</sup> рассмотрены различные способы размещения пластин, а также факторы, влияющие на величину зоны нечувствительности вблизи пластинки. Величина зоны нечувствительности определялась с помощью

источников  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц. Как показывает анализ фотографии следа, выполненный в этой работе, зона нечувствительности имеет форму, показанную на рис. 15. Профиль чувствительной области можно получить, фотографируя объем камеры непосредственно после расширения или газового разряда<sup>8</sup>. При этом, если объем камеры освещается узким пучком света, на фотографии отчетливо видна зона нечувствительности вблизи стенок благодаря отсутствию в ней тумана.

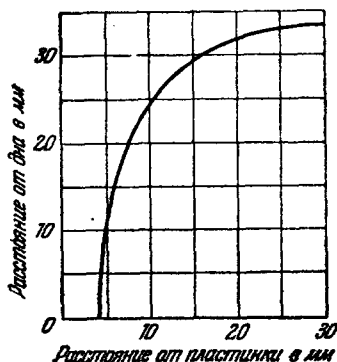


Рис. 15. Профиль чувствительного слоя вблизи пластинки, помещенной в объеме камеры.

режим легко осуществить в диффузионной камере с большой горизонтальной составляющей градиента температуры.

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диффузионная камера обладает рядом преимуществ по сравнению с камерой Вильсона. Этим и обусловлен факт, что в настоящее время диффузионная камера в некоторых применениях (как, например, при работе с ускорителями) вытесняет камеру Вильсона. Диффузионная камера позволяет существенно расширить область применения этого метода регистрации частиц. Так, например, с помощью диффузионной камеры можно зафиксировать все акты ионизации, происходящие в чувствительном слое камеры. Это позволяет использовать диффузионную камеру для абсолютных измерений  $\alpha$ - и  $\beta$ -активностей порядка  $10^{-12}$  кюри<sup>38</sup>. Благодаря непрерывности действия с помощью диффузионной камеры легко регистрировать весьма редкие события, если они сопровождаются образованием сильно ионизирующих частиц.

Диффузионная камера может быть с успехом применена для исследования газового разряда, изучения поведения заряженных капель в электрическом и гравитационном полях, изучения процессов образования и роста капель, а также кристаллов льда на центрах конденсации различного происхождения. С помощью диффузионной камеры можно исследовать рассеяние света на каплях<sup>39</sup>, поведение слоя тумана или дыма в гравитационном и электрическом полях<sup>40</sup>.

Ввиду простоты конструкции и надежности действия диффузионная камера найдет широкое применение не только в исследовательской, но и в учебной работе как демонстрационный прибор, позволяющий производить непрерывное наблюдение следов ионизирующих частиц<sup>30, 41</sup>.

В настоящее время диффузионная камера нашла широкое применение при исследованиях взаимодействия ускоренных частиц с веществом<sup>14, 26, 31</sup>. Она не потеряет своего значения и в дальнейшем, несмотря на развитие таких перспективных приборов, как люминесцентные и пузырьковые камеры.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. R. E. Vollrath, Rev. Sci. Instr. 7, 409 (1936).
2. A. Langsdorf, Phys. Rev. 49, 422 (1936).
3. А. Г. Амелин, Теоретические основы образования тумана в химических производствах, 1951.
4. A. Langsdorf, Rev. Sci. Instr. 10, 91 (1939).
5. C. Succi u. G. Tagliaferri, Nuovo Cimento 9, 1092 (1952).
6. P. Argan, N. Angelo a. A. Gigli, Nuovo Cimento 1, 761—784 (1955).
7. В. К. Ляпидевский, Ю. А. Щербakov, ЖЭТФ 27, 103 (1954).
8. В. К. Ляпидевский, Диссертация, МИФИ, 1956.
9. В. К. Ляпидевский, а. О. П. Астахов, ПТЭ № 1, 43 (1957).
10. H. L. Morrison a. G. J. Plain, Rev. Sci. Instr. 23, 607 (1952).
11. В. К. Ляпидевский, В. М. Мартишин, ПТЭ № 1, 48 (1957).
12. В. К. Ляпидевский, ЖЭТФ 29, 2 (1955).
13. В. К. Ляпидевский, Доклад на Всесоюзной научно-технической конференции по применению радиоактивных и стабильных изотопов и излучений в народном хозяйстве и науке, 1957.
14. Р. М. Суляев, Диссертация, МИФИ, 1956.
15. O. H. Wedle a. C. E. Nielsen, Phys. Rev. 81, 324 (1951).
16. C. E. Nielsen, T. S. Needels a. O. H. Weddle, Rev. Sci. Instr. 22, 673 (1951).
17. P. Harteck u. G. Hertz, Naturwissenschaften 39, 206—207 (1952).
18. В. К. Ляпидевский, О. П. Астахов, ПТЭ № 3, 39 (1956).
19. D. H. Miller, E. C. Fowler a. R. P. Shutt.
20. W. J. Choyke a. C. E. Nielsen, Rev. Sci. Instr. 23, № 6, 307—309 (1952).
21. R. P. Shutt, Rev. Sci. Instr. 22, 730 (1951).
22. A. R. Bevan, J. Sci. Instr. 31, 45—49 (1954).
23. А. П. Комар и М. В. Стабников, ДАН 108, № 1 (1956).
24. В. К. Ляпидевский, ПТЭ (в печати).
25. M. M. Block, W. W. Broun a. G. G. Slaughter, Phys. Rev. 86, 583 (1952).
26. E. C. Fowler, W. B. Fowler, R. P. Shutt, A. M. Thorndike a. W. L. Whittemore, Phys. Rev. 91, 135—149 (1953).
27. D. C. Marshall, D. Broun, Rev. Sci. Instr. 24, № 9, 881 (1953).
28. M. H. Alston, A. V. Greve a. W. H. Evans, Rev. Sci. Instr. 25, № 6, 547 (1954).
29. D. H. Miller, E. C. Fowler, R. P. Shutt, Rev. Sci. Instr. 22, 280 (1951).
30. В. К. Ляпидевский, ПТЭ № 3, 103 (1957).
31. М. С. Козодаев, Р. М. Суляев, А. Филиппов, Ю. А. Щербakov, ДАН 107, 236 (1956).
32. В. К. Ляпидевский, Авторское свидетельство № 100, 754 (1952).
33. В. К. Ляпидевский, ПТЭ № 3, 40 (1956).
34. E. M. Mungon a. J. D. Kurbatow, Rev. Sci. Instr. 23, 380 (1952).
35. W. J. Chogke a. C. E. Nielsen, Rev. Sci. Instr. 23, 307—309 (1952).
36. A. Rogozinski, J. phys. et radium 16, № 2, 166 (1955).
37. О. Гордеев, дипломная работа, МИФИ, 1955.
38. В. К. Ляпидевский, ПТЭ № 2, 37 (1957).
39. R. L. Lander a. C. E. Nielsen, Rev. Sci. Instr. 24, № 1, 20 (1953).
40. В. К. Ляпидевский, ЖЭТФ 30, 399 (1956).
41. В. К. Ляпидевский, Физика в школе, № 1, 47 (1953).