

Дьячков Е. И.

С 244.14

Д-938

Б 2-8-6240.



+

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б 2-8-6240

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1971

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория высоких энергий

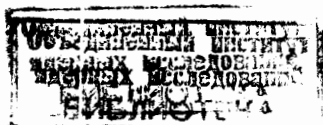
Е.И.ДЬЯЧКОВ

Б2-8-6240

Концентрационная и термическая диффузия примесей
в потоке газа в приложении к задаче о защите от загряз-
нений отвердевшими газами иллюминатора корпуса криоген-
ной пузырьковой камеры с дьюарной теплоизоляцией.

с.ф.3281

13 декабря 71



Дубна, 1971 г.

А Н Н О Т А Ц И Я.

В работе рассмотрены вопросы концентрационной и термической диффузии вымерзающих примесей применительно к криогенной пузырьковой камере с дьюарной системой теплоизоляции. Дана методика определения величины скорости продувки внутренней полости дьюара чистым газом, обеспечивающей защиту иллюминатора корпуса камеры от вымерзающих примесей.

Показано согласие эксперимента с расчётом для 100-см водородной пузырьковой камеры ОИЯИ.

§ I. Загрязнение наружной поверхности иллюминатора корпуса камеры вымерзающими примесями. Защита от загрязнений путем непрерывной продувки дьюара чистым неконденсирующимся газом.

Работоспособность криогенной пузырьковой камеры в значительной степени зависит от чистоты её низкотемпературных систем. Особое внимание должно быть обращено на чистоту рабочего объёма камеры, а также пространства, окружающего наружную поверхность иллюминатора корпуса камеры. Даже незначительные количества примесей, оседающих на оптических поверхностях в виде твердых частиц, приводят к резкому снижению контрастности следов заряженных частиц на плёнке.

Тщательная очистка поверхностей камеры перед сборкой и применение фильтров позволяет относительно легко избавиться от механических примесей. Много сложнее избежать осаждения конденсирующихся примесей. Как выяснилось из эксперимента на 100-см водородной камере ОИЯИ не является достаточным предварительное заполнение пространства дьюара, окружающего иллюминатор камеры, водородом, практически не содержащим примесей.

В процессе работы камеры имеет место непрерывное поступление газообразных примесей (пары воды, масла, двуокись углерода, азот, кислород, окись углерода и др.) в указанное пространство. Примеси поступают в результате гажения поверхностей, находящихся в дьюаре, и диффузии атмосферного воздуха через детали крышки дьюара.

В результате поступления примесей возникает градиент концентрации примесей вдоль столба водорода в дьюаре. У иллюминатора корпуса камеры (Рис.4) концентрация примесей в газе определяется их упругостью пара при температуре стекла (28°K) и для большинства из перечисленных примесей практически равно нулю.

Благодаря градиенту концентрации, а также термодиффузии примеси движутся к стеклу и вымерзают на его поверхности. Основной вклад в поступление примесей путем гажения вносят поверхности, имеющие относительно высокую температуру, т.е. поверхности, расположенные у крышки дьюара.

С целью уменьшения гажения стенок необходимо использовать материалы, имеющие относительно невысокую скорость газоотделения и производить тренировку поверхностей.

В настоящее время основной характеристикой материала по газоотделительным свойствам считают изменение удельной скорости газоотделения в зависимости от времени откачки при постоянной температуре. Временная зависимость удельной скорости газоотделения для различных материалов описывается двумя видами уравнений

$$w_{\tau} = k_1 e^{-\alpha \tau} \quad ; \quad (1)$$

$$w_{\tau} = k_2 \tau^{-\alpha} \quad ; \quad (2)$$

где w_{τ} - скорость газоотделения в какой-то момент времени откачки - τ ;

τ - время откачки ($\tau \leq 100$ часов) ;

k_1 , k_2 , α и α - постоянные.

В большинстве случаев уменьшение газоотделения со временем при комнатной температуре находится в согласии с уравнением (2), причем для металлов и керамики α равно примерно 1, для эластичных материалов и пластиков $\alpha = \frac{1}{2}$. Реже наблюдается экспоненциальная зависимость, соответствующая уравнению (1).

В работе / 1 / приведены значения скорости газоотделения конструкционных материалов при различных способах их обработки. Показано, что промывка материалов бензолом, бензином и спиртом

уменьшает скорость газоотделения примерно в 4 раза. Механическая и химическая обработки дают уменьшение скоростей газоотделения на порядок величины.

Ранний опыт эксплуатации 100-см водородной камеры показал, что длительная тренировка (в течение 300 часов) внутреннего пространства дьюара периодической откачкой его и заполнением чистым водородом, не обеспечивала достаточную продолжительность работы камеры без загрязнения наружной поверхности иллюминатора корпуса камеры вымерзающими примесями. При такой тренировке незначительный фон появлялся уже в первые сутки работы камеры после охлаждения её до рабочей температуры (Рис. 2А). Через 5 суток работы камеры фон становился предельно допустимым для обработки снимков (Рис. 2В).

В том случае, когда тренировка внутреннего пространства дьюара после сборки камеры производилась лишь в течение 8+10 часов, фон был значительным уже в первые сутки после охлаждения камеры до рабочей температуры (Рис. 1А).

Если в конструкции камеры имеются различного рода резиновые мембраны, прокладки, тонкие стенки и т.п., разделяющие атмосферный воздух (или другие объёмы с конденсирующимся газом) от внутренней полости дьюара, то, как показывают расчёты на основании данных, по диффузии в твёрдых телах / 2 /, количество диффундирующих примесей из атмосферы может быть значительным. В этом случае длительное обезгаживание поверхностей, находящихся в дьюаре, обеспечит снижение поступающих примесей лишь до уровня, постоянно диффундирующего через стенки.

На ранней стадии эксплуатации камеры наши попытки, направленные на уменьшение поступления вымерзающих примесей в пространство, окружающее камеру (замена некоторых органических материалов на

металлы, тренировка внутренней полости дьюара продолжительностью до I месяца, постановка водородного шлюза между ёмкостью аварийного сброса и предохранительными клапанами на дьюаре и др. позволили обеспечить работу камеры с допустимым загрязнением иллюминатора камеры лишь в течение I недели.

Повидимому, диффузионная откачка внутренней полости дьюара в процессе работы камеры также не разрешила бы указанной проблемы. Высокий вакуум в указанном пространстве удалось бы создать. Однако конструкция камеры такова, что стекло корпуса камеры имеет температуру жидкого водорода и по площади занимает значительную долю от всех холодных поверхностей. В этом случае иллюминатор является крионасосом с большой производительностью (значительно большей, чем разумно можно было бы установить для диффузионной откачки). Поэтому значительная часть поступающих примесей захватывалась бы иллюминатором камеры.

В конечном счёте нами был предложен способ защиты от загрязнений отвердевшими газами поверхностей охлажденных сосудов, окруженных неконденсирующимся газом / 3 /, а также низкотемпературная пузырьковая камера / 4 /, в которой применение указанного способа позволяет обеспечить надёжную защиту иллюминатора камеры от вымерзающих примесей (Рис. 3) практически без тренировки внутренней полости дьюара перед охлаждением камеры.

Сущность предложенного способа защиты заключается в том, что в процессе работы камеры в пространстве около защищаемой поверхности (наружной поверхности иллюминатора корпуса камеры) организуется непрерывный поток чистого неконденсирующегося газа (водорода) со скоростью, достаточной для ограничения количества диффундирующих примесей к стеклу на выбранном уровне. Чистый газ

должен перемещаться в направлении противоположном направлению диффузии примесей. Загрязненный газ в количестве, равном поступающему чистому газу, выбрасывают из указанного пространства.

В качестве источника газа для продувки нами используется жидкий водород, испарившийся в радиаторном змеевике камеры и отфильтрованный фторопластовым фильтром 8 с порами 1 микрон. Поток поступает через перфорированную трубку 6 диаметром 6 x 1 мм, размещенную по периферии фланца камеры. Объемная скорость продувки устанавливается с помощью игольчатого вентиля 7 с проходом диаметром 3 мм.

Обычно при работе камеры объемная скорость продувки составляет $\sim 0,5 \text{ нм}^3/\text{час}$, что соответствует средней линейной скорости потока в сечении дьюара 1 (у крышки) $\bar{v}_1 = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ м/сек}$ и в сечении 2 (в верхней плоскости радиатора) $\bar{v}_2 = 0,14 \cdot 10^{-4} \text{ м/сек}$. Поток газа отнесен ко всему сечению внутренней полости дьюара.

Выброс загрязненного газа осуществляется из крышки дьюара 4 с помощью регулятора давления в дьюаре 9. Количество продуваемого водорода контролируется ротаметром 5.

Методика определения необходимой скорости продувки рассматривается ниже.

§ 2. Концентрационная и термическая диффузия примесей в одномерном ламинарном потоке газа.

2-1. Бинарная смесь.

С целью получения количественных соотношений для решения конкретной задачи о диффузии примесей к иллюминатору корпуса 100-см водородной камеры рассмотрим задачу о концентрационной и термической диффузии в одномерном ламинарном потоке бинарной смеси.

Для одномерного потока бинарной смеси при постоянном давлении и переменной температуре в отсутствии внешних сил плотность потока

молекул первого компонента смеси в направлении z (Рис.5) для произвольного сечения z определится уравнением

$$N_1 = -n D_{12} \frac{dn_{10}}{dz} - n D_T \frac{1}{T} \frac{dT}{dz} - n v n_{10}, \quad (3)$$

где для произвольного сечения z

N_1 - плотность потока молекул первого компонента в направлении z ;

n - общее число молекул в единице объёма смеси;

D_{12} - коэффициент концентрационной диффузии для бинарной смеси I-2;

D_T - коэффициент термической диффузии для бинарной смеси I-2;

n_{10} - концентрация молекул первого компонента;

$\frac{dn_{10}}{dz}$ - градиент концентрации молекул первого компонента в направлении z ;

T - абсолютная температура газовой смеси;

$\frac{dT}{dz}$ - градиент температуры в газовой смеси в направлении z ;

v - скорость потока газовой смеси.

Примем во внимание, что в произвольном сечении z :

$$n = n_1 + n_2 \quad ; \quad n_{10} + n_{20} = 1 \quad ; \quad n_{10} = \frac{n_1}{n} ;$$

$$n_{20} = \frac{n_2}{n} .$$

Здесь n_1 и n_2 - числа молекул первого и второго компонентов в единице объёма смеси; n_{20} - концентрация молекул второго компонента.

Как известно / 5 /, коэффициенты D_T и D_{12} представляют собой сложные функции и зависят от масс молекул, их количеств, а также величин, определяемых межмолекулярными силами.

Обычно при исследованиях термодиффузии пользуются термодиффузионным отношением K_T , определяемым выражением

$$K_T = \frac{\mathfrak{D}_T}{\mathfrak{D}_{12}} \quad (4)$$

Введя в уравнение (3) величину K_T , запишем уравнение (3) в виде

$$N_1 = -n \mathfrak{D}_{12} \frac{dn_{10}}{dz} - n \mathfrak{D}_{12} K_T \frac{1}{T} \frac{dT}{dz} - n \vartheta n_{10} \quad (5)$$

Граничные условия задачи.

Для сечения 1. $z = 0$;

$$N_1 = (N_1)_1 ; \quad n = (n)_1 ; \quad \mathfrak{D}_{12} = (\mathfrak{D}_{12})_1 ;$$

$$n_{10} = (n_{10})_1 ; \quad \frac{dn_{10}}{dz} = \left(\frac{dn_{10}}{dz} \right)_1 ;$$

$$K_T = (K_T)_1 ; \quad T = T_1 ; \quad \vartheta = \vartheta_1 .$$

Для сечения 2. $z = H$;

$$N_1 = (N_1)_2 ; \quad n = (n)_2 ; \quad \mathfrak{D}_{12} = (\mathfrak{D}_{12})_2 ;$$

$$n_{10} = (n_{10})_2 ; \quad \frac{dn_{10}}{dz} = \left(\frac{dn_{10}}{dz} \right)_2 ;$$

$$K_T = (K_T)_2 ; \quad T = T_2 ; \quad \vartheta = \vartheta_2 .$$

В дальнейшем будем рассматривать установившееся состояние,

т.е.

$$N_1 = (N_1)_1 = (N_1)_2 = \text{const.}$$

или

$$\frac{dN_1}{dz} = 0$$

Задачу будем решать для случая, когда температура в сечениях потока меняется линейно от z , т.е.

$$T = T_1 + (T_2 - T_1) \frac{z}{H} \quad (6)$$

В этом случае температурный градиент $\frac{dT}{dz}$ постоянный во всех сечениях z и равен

$$\frac{dT}{dz} = \frac{T_2 - T_1}{H} \quad (7)$$

Объёмная концентрация молекул обоих компонентов n для газа вдали от критического состояния обратнопропорциональна температуре T , т.е.

$$n = (n)_1 \frac{T_1}{T} \quad (8)$$

Коэффициент взаимной диффузии D_{12} для модели жестких сфер при постоянной плотности пропорционален $T^{1/2}$, а при постоянном давлении $T^{3/2}$. Для моделей, более близких к реальным молекулам, коэффициент D_{12} меняется от температуры значительно быстрее. При низких температурах D_{12} при постоянной плотности изменяется пропорционально $T^{5/6}$, а при высоких температурах при постоянной плотности коэффициент D_{12} возрастает с температурой приблизительно как $T^{2/3}$ / 6 / . Исследуя зависимость D_{12} от температуры при постоянном давлении по экспериментальным данным, например / 7 /, можно увидеть, что при комнатной температуре при постоянном давлении коэффициент D_{12} приблизительно пропорционален T^2 .

Таким образом, с достаточной для инженерных расчётов точностью в задачах, где температура смеси незначительно превышает комнатную, можно принять, что коэффициент D_{12} при постоянном давлении пропорционален T^2 .

Коэффициент диффузии D_{12} слабо зависит от концентрации компонентов в смеси / 5 /, поэтому в расчётах можно пренебречь этой зависимостью.

Коэффициент диффузии D_{12} при постоянной температуре обратно пропорционален давлению смеси.

Таким образом, для дальнейших расчётов примем:

$$(\mathcal{D}_{12})_{P,T} = (\mathcal{D}_{12})_{P_1,T_1} \left(\frac{T}{T_1} \right)^2 \left(\frac{P_1}{P} \right), \quad (9)$$

где $(\mathcal{D}_{12})_{P,T}$ и $(\mathcal{D}_{12})_{P_1,T_1}$ - коэффициенты взаимной диффузии для смеси 1-2 при давлении P и температуре T и при P_1, T_1 .

Экспериментальные значения коэффициентов диффузии D_{12} некоторых газовых смесей представлены в таблице I.

Рассмотрим от каких факторов зависит термодиффузионное отношение K_T .

K_T сильно зависит от состава смеси, что делает полезным введение термодиффузионной постоянной α , определяемой выражением:

$$\alpha = \frac{K_T}{n_{10} n_{20}} \quad (10)$$

При изучении термодиффузии вводят величину R_T , называемую отношением термодиффузионных постоянных. Определенная экспериментально величина R_T представляет собой отношение экспериментально определенных значений K_T (эксп) или α (эксп) для данной смеси к соответствующим теоретическим значениям $K_T(\infty)$ или $\alpha(\infty)$ для той же смеси, подсчитанным на основе допущения, что молекулы взаимодействуют как упругие шары, т.е.

$$R_T^{\text{эксп}} = \frac{K_T^{\text{эксп}}}{K_T(\infty)} = \frac{\alpha^{\text{эксп}}}{\alpha(\infty)} \quad (11)$$

Тогда из уравнений 10 и 11 получим

$$K_T = \alpha(\infty) n_{10} n_{20} R_T^{\text{эксп}} \quad (12)$$

R_T зависит от относительного содержания компонентов в меньшей

Таблица I.

Экспериментальные значения коэффициентов диффузии D_{I2} некоторых газовых смесей.

Смесь	Давление, тор.	Температура $T^{\circ}K$	$D_{I2}, \text{см}^2/\text{сек}$	Литература
$H_2 - N_2$	760	273,2	0,674	5
"	760	293,2	0,8	7
"	760	373,2	1,251	7
"	760	473,2	1,86	7
$H_2 - CO_2$	760	273,2	0,550	5
"	760	293,2	0,65	7
"	760	393,2	1,02	7
"	760	473,2	1,54	7
$H_2 - O_2$	760	273,2	0,697	5
$H_2 - CO$	760	273,2	0,651	5
$H_2 - CH_4$	760	273,2	0,625	5
$N_2 - O_2$	760	273,2	0,181	5
$N_2 - CO$	760	273,2	0,192	5
$N_2 - CO_2$	760	273,2	0,144	5
$H_2 - He$	700	294,4	1,504	8
$He - N_2$	690	289,4	0,717	8

степени, чем α , и поэтому может рассматриваться как характеристика смеси при данной температуре. / 9 /

Термодиффузионная постоянная α изменяется с ростом давления, но значительно слабее, чем коэффициент взаимной диффузии D_{12} . Так, в смеси равных количеств H_2 и CO_2 при увеличении давления с 3 до 80 атмосфер α увеличивалась в три раза, а смесь азота и водорода при том же росте давления дала увеличение α только на 30% / 10 /.

Поэтому для решения задачи с учётом термодиффузии, если давление смеси не сильно отличается от атмосферного, можно пользоваться экспериментальными данными α (эксп) и $R_T^{\text{эксп}}$, определенными для смеси при атмосферном давлении.

Поскольку аналитические зависимости $R_T^{\text{эксп}}$ от температуры для различных смесей различны и громоздки, в дальнейшем при решении задачи будем пользоваться средним значением $\bar{R}_{(T_1-T_2)}^{\text{эксп}}$ для данной смеси в интервале температур T_1-T_2 и выражение для K_T запишем в виде:

$$K_T = \bar{K}_{(T_1-T_2)} = \alpha(\infty) n_{10} n_{20} \bar{R}_{(T_1-T_2)}^{\text{эксп}}, \quad (13)$$

где $\bar{K}_{(T_1-T_2)}$ и $\bar{R}_{(T_1-T_2)}^{\text{эксп}}$ - средние значения K_T и R_T в диапазоне температур T_1 и T_2 для данной смеси.

В таблице 2 приведены значения $R_T^{\text{эксп}}$ и $\bar{R}_{(T_1-T_2)}^{\text{эксп}}$ для некоторых смесей с равным содержанием компонентов.

Из молекулярно-кинетической теории газов для модели твердых упругих шаров известно выражение / 5 /

$$\alpha(\infty) = \frac{S_1 n_{10} - S_2 n_{20}}{Q_1 n_{10}^2 + Q_2 n_{20}^2 + Q_{12} n_{10} n_{20}}, \quad (14)$$

Таблица 2.

Значение $R_T^{\text{эксп}}$, определенное экспериментально для некоторых смесей с равным содержанием компонентов. Если дан температурный интервал, то $R_T^{\text{эксп}}$ - среднее значение в этом интервале $\bar{R}_{(T_1-T_2)}^{\text{эксп}}$, если дано ^{одно} значение температуры, то $R_T^{\text{эксп}}$ относится к этой температуре.

Смесь	$T_1 + T_2$ °К	эксп. R_T	Литература
H ₂ - He	600 + 90	0,59	I2
H ₂ - He	292 + 90	0,58	I3
H ₂ - He	292 + 20	0,59	I3
H ₂ - Ne	290 + 90	0,57	I4
H ₂ - Ne	290 + 20	0,34	I4
H ₂ - CO	288 + 373	0,58	I5
H ₂ - CO	293 + 90	0,38	I3
H ₂ - N ₂	373 + 288	0,60	I5
H ₂ - N ₂	292 + 90	0,42	I3
H ₂ - N ₂	293	0,49	I6
H ₂ - CO ₂	373 + 288	0,49	I7
He - N ₂	373 + 287	0,62	I8

где n_{10} и n_{20} концентрации молекул первого и второго компонентов в бинарной смеси;

$Q_1, Q_2, Q_{12}, S_1, S_2$ - величины, зависящие от относительной разности масс молекул и их диаметров.

Из уравнения (14) видно, что при малых концентрациях n_{10} значения $\alpha(\infty)$ слабо отличаются от значения $\alpha(\infty)$ при n_{10} стремящейся к нулю, т.е.

$$[\alpha(\infty)]_{n_{10}} \approx [\alpha(\infty)]_{n_{10} \rightarrow 0}.$$

Так, для смесей водород-окись углерода; водород-азот, водород-дву-окись углерода значения $\alpha(\infty)$ при $n_{10} = 0,01$ отличаются от значения $\alpha(\infty)$ при $n_{10} \rightarrow 0$ лишь на 3-5%. Поэтому в дальнейшем будем принимать значение $\alpha(\infty)$ постоянным и равным

$\alpha(\infty)$ при $n_{10} \rightarrow 0$ с оговоркой, что ошибка при вычислениях невелика в случаях, когда $n_{10} < 0,01$.

Для некоторых смесей для модели твердых шаров значения Q_1, Q_2, Q_{12}, S_1 и S_2 , а также вычисленные нами значения термодиффузионной постоянной при концентрациях n_{10} стремящейся к нулю $[\alpha(\infty)]_{n_{10} \rightarrow 0}$ представлены в таблице 3.

Выражение для K_T из уравнения (13) при $n_{10} < 10^{-2}$ запишется в виде

$$K_T = K_{T_1-T_2} = [\alpha(\infty)]_{n_{10} \rightarrow 0} \bar{R}_{T_1-T_2}^{\text{эксп}} n_{10}. \quad (15)$$

Вектор скорости потока газа как целого V для бинарной смеси определяется уравнением

$$V = n_{10} V_1 + n_{20} V_2$$

Здесь: V_1 и V_2 - векторы средних скоростей молекул первого и второго компонентов смеси; n_{10} и n_{20} концентрации молекул первого и второго компонентов.

Таблица 3

Вычисленные значения термодиффузионных постоянных для некоторых смесей при использовании модели твердых сфер. $\frac{m_1}{m_2}$ - отношение масс молекул бинарной смеси; $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ - отношение диаметров молекул; S, Q - величины в уравнении (14) для $\alpha(\infty)$; $[\alpha(\infty)]_{n_{10} \rightarrow 0}$ - термодиффузионная постоянная для смеси, когда $n_{10} \rightarrow 0$ стремится к нулю. Значения S_1, S_2, Q_1, Q_2 и Q_{12} взяты из работы

Смесь	$\frac{m_1}{m_2}$	$\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$	S_1	$-S_2$	Q_1	Q_2	Q_{12}	$[\alpha(\infty)]_{n_{10} \rightarrow 0}$
H ₂ -He	2,0	0,80	0,341	0,511	1,355	2,186	3,642	0,141
H ₂ -CO	13,9	1,38	0,550	0,487	1,430	0,438	1,784	1,105
H ₂ -N ₂	13,9	1,38	0,550	0,487	1,430	0,438	1,784	1,105
H ₂ -O ₂	15,9	1,33	0,510	0,443	1,320	0,405	1,630	1,095
H ₂ -CO ₂	21,8	1,70	0,540	0,348	1,409	0,232	1,275	1,5
He-N ₂	7,00	1,73	0,805	0,718	2,137	0,554	2,584	1,295
N ₂ -CO ₂	1,57	1,23	0,408	0,418	2,154	1,480	3,380	0,283

При установившемся состоянии плотности потоков обоих компонентов в каждом сечении потока постоянны, т.е.

$$n_1 V_1 + n_2 V_2 = \text{const}$$

Поскольку $n_1 = \frac{n_{10}}{n}$; $n_2 = \frac{n_{20}}{n}$, то

$$V = \frac{n_1 V_1 + n_2 V_2}{n} = \frac{\text{const}}{n}$$

Таким образом, скорость потока газа V , или в нашем случае ϑ , обратно пропорциональна числу молекул в единице объёма газа, которое в свою очередь обратно пропорционально температуре газа, т.е.

$$\vartheta = \vartheta_1 \frac{T}{T_1} \quad (16)$$

Подставив в уравнение (5) выражения для n , \mathcal{D}_{12} , K_T , T и ϑ , полученные соответственно из уравнений (8), (9), (15), (6) и (16), после преобразований получим

$$N_1 = \frac{(n)_1 (\mathcal{D}_{12})_1 [T_1 H + (T_2 - T_1) z]}{T_1 H} \frac{dn_{10}}{dz} - \frac{(n)_1 (\mathcal{D}_{12})_1 (T_1 - T_2) [\alpha(\infty)] n_{10} \rightarrow 0 \bar{R}_{T_1 - T_2}^{\text{экс}}}{T_1 H} n_{10} - (n)_1 \vartheta_1 n_{10} \quad (17)$$

Для установившегося состояния $\frac{dN_1}{dz} = 0$. В результате дифференцирования уравнения (17) по z получим после преобразований

$$\frac{dN_1}{dz} = \frac{d^2 n_{10}}{dz^2} + \frac{\left\{ (T_2 - T_1) \left[1 + [\alpha(\infty)] n_{10} \rightarrow 0 \bar{R}_{T_1 - T_2}^{\text{экс}} \right] + \frac{\vartheta_1 T_1 H}{(\mathcal{D}_{12})_1} \right\}}{[T_1 H + (T_2 - T_1) z]} \frac{dn_{10}}{dz} = 0 \quad (18)$$

Обозначим

$$W = \left[\frac{\vartheta_1 T_1 H}{(\mathcal{Q}_{12})_1 (T_1 - T_2)} - [\alpha(\infty)] n_{10} \rightarrow 0 \bar{R}_{T_1 - T_2}^{\text{эксп}} \right] \quad (19)$$

и уравнение (18) перепишем в виде

$$\frac{d n_{10}}{d z^2} + \frac{(T_1 - T_2)(W - 1)}{[T_1 H + (T_2 - T_1) z]} \frac{d n_{10}}{d z} = 0. \quad (20)$$

Общим решением дифференциального уравнения (20) будет

$$n_{10} = C_1 \frac{[T_1 H + (T_2 - T_1) z]^W}{(T_2 - T_1) W} + C_2, \quad (21)$$

где C_1 и C_2 - постоянные интегрирования.

Для граничных условий задачи:

при $z = 0$ $n_{10} = (n_{10})_1$ и при $z = H$ $n_{10} = (n_{10})_2$

решение уравнения (20) будет

$$n_{10} = \frac{(n_{10})_1 \left\{ [T_1 H + (T_2 - T_1) z]^W - (T_2 H)^W \right\} + (n_{10})_2 \left\{ (T_1 H)^W - [T_1 H + (T_2 - T_1) z]^W \right\}}{[(T_1 H)^W - (T_2 H)^W]} \quad (22)$$

Здесь W см, выражение (19)

Продифференцировав уравнение (22) по z , имеем

$$\frac{d n_{10}}{d z} = \frac{[(n_{10})_1 - (n_{10})_2] (T_2 - T_1) W [T_1 H + (T_2 - T_1) z]^{W-1}}{[(T_1 H)^W - (T_2 H)^W]} \quad (23)$$

При $z = 0$

$$\left(\frac{dn_{10}}{dz} \right)_{z=0} = \frac{[(n_{10})_1 - (n_{10})_2](T_2 - T_1)W(T_1 H)^{W-1}}{[(T_1 H)^W - (T_2 H)^W]} \cdot \quad (24)$$

Подставляя в уравнение (17) значение $z=0$, $\frac{dn_{10}}{dz} = \left(\frac{dn_{10}}{dz} \right)_{z=0}$ после
из уравнения (24) и значение $(n_{10})_{z=0} = (n_{10})_1$, преобразований имеем

$$N_1 = (n)_1 \frac{(Q_{12})_1 (T_1 - T_2) W (n_{10})_1 \left[\left(\frac{T_2}{T_1} \right)^W - \frac{(n_{10})_2}{(n_{10})_1} \right]}{T_1 H \left[1 - \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^W \right]} \quad (25)$$

Здесь W см. выражение (19).

Положив в уравнение (25) $N_1 = 0$, можно определить скорость потока газа ϑ_1 , при которой поток молекул первого компонента в направлении z будет равен нулю.

Частные случаи решения уравнения (5).

I-ый случай. $K_T = 0$, $\vartheta = 0$. Этот случай соответствует условию, когда термодиффузионное отношение K_T оказалось равным нулю, либо когда термодиффузия не учитывается, а температура T меняется по линейному закону. В этом случае уравнение (5) запишется в виде

$$N_1 = - \frac{(n)_1 (Q_{12})_1 [T_1 H + (T_2 - T_1)z]}{T_1 H} \frac{dn_{10}}{dz} \cdot \quad (26)$$

Для установившегося состояния, когда $\frac{dN_1}{dz} = 0$, имеем

$$\frac{d^2 n_{10}}{dz^2} + \frac{(T_2 - T_1)}{T_1 H + (T_2 - T_1)z} \frac{dn_{10}}{dz} = 0 \cdot \quad (27)$$

Для граничных условий:

при $z = 0$ $n_{IO} = (n_{IO})_1$;

при $z = H$ $n_{IO} = (n_{IO})_2$.

Решением уравнения (27) будет:

$$n_{IO} = \frac{(n_{IO})_1 \ln \frac{T_1 H + (T_2 - T_1) z}{T_2 H} + (n_{IO})_2 \ln \frac{T_1 H}{T_1 H + (T_2 - T_1) z}}{\ln \frac{T_1}{T_2}} \quad (28)$$

и

$$N_1 = \frac{(n_{IO})_1 (D_{12})_1 (T_1 - T_2) [(n_{IO})_1 - (n_{IO})_2]}{T_1 H \ln \frac{T_1}{T_2}} \quad (29)$$

2-ой случай $T_1 = T_2 = T = \text{const}$; $\vartheta \neq 0$

Т.е. случай концентрационной диффузии в изотермическом потоке газа.

Здесь уравнение (5) запишется в виде

$$N_1 = -n \left(D_{12} \frac{dn_{IO}}{dz} + \vartheta n_{IO} \right) \quad (30)$$

Для установившегося состояния, когда $\frac{dN_1}{dz} = 0$, имеем

$$D_{12} \frac{d^2 n_{IO}}{dz^2} + \vartheta \frac{dn_{IO}}{dz} = 0 \quad (31)$$

Для граничных условий

при $z = 0$ $n_{IO} = (n_{IO})_1$,

при $z = H$ $n_{IO} = (n_{IO})_2$

Решением уравнения (31) будет

$$n_{IO} = (n_{IO})_1 - [(n_{IO})_1 - (n_{IO})_2] \frac{1 - e^{-\frac{\vartheta z}{D_{12}}}}{1 - e^{-\frac{\vartheta H}{D_{12}}}} \quad (32)$$

$$и \quad N_1 = n \vartheta \frac{[(n_{IO})_1 - (n_{IO})_2 e^{-\frac{\vartheta H}{D_{12}}}] }{e^{-\frac{\vartheta H}{D_{12}}} - 1} \quad (33)$$

Уравнения (28), (29), (32) и (33) справедливы для любых значениях концентраций компонентов смеси.

2-2. Многокомпонентная смесь.

В работе / II / рассматривается диффузия в многокомпонентных смесях. Задача о диффузии в многокомпонентных смесях существенно упрощается, если концентрация одной из компонент значительно больше концентрации остальных компонент смеси.

Выражение потока \dot{N}_i - рода - N_i в ν - компонентной смеси, когда концентрация ν - компоненты значительно больше концентраций остальных компонент ($n_{\nu 0} \gg n_{i 0}$) в случае, когда диффузия имеет место только под действием градиента концентраций, принимает вид

$$N_i = -n D_{i-mix} \frac{dn_{i0}}{dz} \quad (34)$$

Здесь n - общее число молекул в единице объёма смеси; D_{i-mix} - коэффициент диффузии i - компоненты в ν - компонентной смеси;

$D_{i-\nu}$ - коэффициент диффузии i - компоненты в двухкомпонентной смеси $i-\nu$;

n_{i0} - концентрация молекул i - компоненты в ν - компонентной смеси.

Таким образом, в этом случае для решения задачи могут быть использованы зависимости для двухкомпонентной смеси, в которой первой компонентой будет i - компонента, а второй компонентой будет ν - компонента ν - компонентной смеси.

Если же коэффициенты диффузии i -компонентов (назовём примесями) по отношению к ν - компоненте равны, а концентрация ν - компоненты значительно больше концентрации примесей, то

плотность потока примесей N_n определится выражением

$$N_n = - \sum_1^k n D_{i-mix} \frac{dn_{i0}}{dz} \quad (35)$$

Поскольку,

$$D_{i-mix} = D_{i-v} = D_{1-v} = D_{2-v} = \dots = D_{k-v},$$

где $D_{1-v}, D_{2-v}, \dots, D_{k-v}$ - коэффициенты диффузии i - компонентов (составляющих примеси) по отношению к v - компоненте смеси,

$$\sum_1^k n_{i0} = n_{10} + n_{20} + \dots + n_{k0} = n_{n0} \quad (36)$$

где $n_{10}, n_{20}, \dots, n_{k0}$ - концентрации каждой из компонент примесей;

n_{n0} - концентрация примесей,

тогда

$$N_n = - n D_{n-v} \frac{dn_{n0}}{dz} \quad (37)$$

где D_{n-v} - коэффициент диффузии примесей по отношению к v - компоненте смеси.

$$D_{n-v} = D_{i-v} = D_{1-v} = D_{2-v} = \dots = D_{k-v}$$

Следовательно, для такой многокомпонентной смеси могут быть использованы уравнения концентрационной диффузии в двухкомпонентной смеси, в которой первой компонентой будут примеси, а второй компонентой будет v - компонента многокомпонентной смеси.

§ 3. Диффузия вымерзающих примесей к наружной поверхности иллюминатора корпуса 100-см водородной камеры.

3-1. Предпосылки к расчёту.

Конкретно задачу о диффузии вымерзающих примесей к

иллюминатору корпуса описываемой камеры представим в следующем виде (Рис.4).

В верхней части внутренней полости дьюара (сечение I) при температуре $T_I = 293^{\circ}\text{K}$ имеются примеси в водороде, суммарная концентрация которых $(n_{IO})_I$ обусловлена гажением поверхностей, находящихся в указанном месте, а также диффузией из атмосферы через крышку дьюара и её детали. В сечении 2 внутренней полости дьюара (уровень верхней плоскости радиатора) температура $T_2 = 28^{\circ}\text{K}$, а концентрация примесей в водороде $(n_{IO})_2$. Для упрощения расчётов гажение поверхностей, расположенных между крышкой дьюара и иллюминатором корпуса камеры, учитывать не будем, поскольку большая часть из этих поверхностей находится при температуре существенно более низкой, чем температура крышки T_I , и поэтому газящая способность их в сравнении с тёплыми стенками значительно меньше. Радиальной диффузией через внутреннюю оболочку дьюара пренебрегаем. Расчёты будем проводить для установившегося состояния.

Примем распределение температуры по высоте столба газа в дьюаре линейным, а изотермические поверхности внутренней полости дьюара плоскими и параллельными крышке дьюара.

Поскольку концентрация примесей ($\text{CO}_2, \text{N}_2, \text{O}_2, \text{CO}, \text{H}_2\text{O}$) мала по отношению к основной компоненте смеси - водороду, а коэффициенты диффузии указанных примесей в водороде близки друг к другу, то задачу можно упростить: примеси будем считать состоящими из одного компонента, например, азота.

Рассмотрим отдельно два случая:

1) водород в дьюаре неподвижен, 2) водород в дьюаре движется вверх с некоторой средней скоростью \bar{v} .

3-2. Диффузия примесей, когда водород в дьюаре неподвижен.
Количество вымерзающих примесей, дающее фон на фото-
графиях.

Принятые предпосылки позволяют воспользоваться решениями, полученными в § 2 для задачи об одномерной диффузии.

Количество диффундирующих примесей (азота) к иллюминатору корпуса камеры может быть вычислено по уравнению (25).

Здесь и в дальнейшем будем вычислять количество диффундирующих примесей в $\text{нсм}^3/\text{см}^2 \text{ сек}$. Для этого необходимо в используемые уравнения подставлять вместо $(n)_1$ величину

$$(n)_1 = \frac{P_1}{P_0} \frac{T_0}{T_1}, \quad (38)$$

где P_1 и T_1 - рабочее давление в дьюаре и температура водорода у крышки дьюара;

P_0 и T_0 - давление и температура при нормальных условиях.

Концентрацию примесей будем определять в объёмных долях.

Для 100-см водородной камеры принимаем следующие исходные данные для расчётов (Рис.4). Смесь бинарная, состоящая из водорода и примесей азота. Температуры: $T_1 = 293^\circ\text{K}$, $T_2 = 28^\circ\text{K}$. Расчётная высота $H = 93 \text{ см}$ (равна расстоянию от крышки дьюара до верхней плоскости радиатора). Давление в дьюаре $P_1 = 1,45 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$. Для смеси N_2 и H_2 из таблицы 3 находим

$[\alpha(\infty)]_{n_{10} \rightarrow 0} = 1,105$. Обозначения здесь такие же как и в § 2. Поскольку данных по значению $\bar{R}_{T_1-T_2}^{\text{эксп}}$ для смеси N_2-H_2 в диапазоне $(293-28)^\circ\text{K}$ не имеем, принимаем для расчётов значение $\bar{R}_T^{\text{эксп}}$ в диапазоне $(293 \div 90)^\circ\text{K}$ (таблица 2), т.е.

$$\bar{R}_{T_1-T_2}^{\text{эксп}} = 0,42. \text{ Из таблицы I находим } D_{12} = D_{N_2-H_2} = 0,76 \frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$$

при давлении 760 мм рт.ст. и температуре 293,2°К. Значение D_{I2} при наших условиях T_I и P_I определим, пользуясь уравнением (9)

$$(D_{I2})_I = 0,67 \text{ см}^2/\text{сек.}$$

Пользуясь уравнением (I9), вычислим значение W . $W = - 0,465$.

С помощью газоанализатора типа МКЗ/ I9 / было определено, что концентрация примесей у крышки дьюара при работе камеры, когда нет продувки, остаётся практически постоянной и составляет

$$(n_{IO})_I \approx 10^{-5} \text{ объёмных долей.}$$

Принимаем концентрацию примесей $(n_{IO})_2 = 0$. Подставляя численные значения в уравнение (25), находим количество примесей, диффундирующих к иллюминатору корпуса камеры

$$(N_I)_{\vartheta=0} = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ нсм}^3/\text{сек.см}^2.$$

Заметим здесь, что изменение концентрации примесей $(n_{IO})_2$ в пределах от 10^{-7} до нуля, когда $(n_{IO})_I \gg 10^{-7}$, не оказывает существенного влияния на величину $(N_I)_{\vartheta=0}$. Значение концентрации $(n_{IO})_2 = 10^{-7}$ соответствует молярной доли азота в паре для системы азот-водород (газ-кристалл) при температуре 28°К и давлении $1,15 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$. Получено экстраполированием из кривой фазового равновесия системы азот-водород, приведенной в сборнике / 20 /.

Экспериментально, путём улавливания испарившихся примесей при отеплении дьюара, за 12 дней работы камеры количество вымерзших в дьюаре примесей составило около 400 нсм³. При этом в первые сутки после начала охлаждения камеры до рабочей температуры на иллюминаторе появился небольшой фон (рис. 2А).

Расчётное количество вымерзающих примесей за время работы камеры $\tau = 12$ суток при площади поперечного сечения внутренней полости дьюара $F = 0,85 \text{ м}^2$ составит:

$$(N_1)'_{\theta=0} = (N_1)_{\theta=0} \tau F = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot 8,6 \cdot 10^4 \cdot 12 \cdot 8500 = 500 \text{ нсм}^3.$$

Расчётное количество хорошо согласуется с экспериментальным.

Оценим минимальное количество примесей, вымерзающих на иллиминаторе N_{\min} , которое даёт отчётливо наблюдаемый на фотографиях фон, т.е. через 3 суток после начала работы камеры без продувки (Рис. 2Б), а также количество примесей $(N_{\min})_{\text{кр}}$, дающее еле заметный фон, т.е. через 1 сутки после начала работы камеры без продувки (Рис. 2А).

Принимая, что в единицу времени количество поступающих примесей к иллиминатору постоянно в процессе всей работы камеры; примеси равномерно покрывают иллиминатор, площадью $0,4 \text{ м}^2$, которая составляет 25% от площади поверхностей, на которых происходит вымерзание примесей, а 1000 нсм^3 примесей дают 1 см^3 твердого вещества, имеем следующее:

количество примесей N_{\min} на 1 м^2 поверхности иллиминатора

$$N_{\min} = \frac{500 \cdot 3 \cdot 0,25}{12 \cdot 0,4} = 78 \frac{\text{нсм}^3}{\text{м}^2}.$$

Толщина слоя примесей на иллиминаторе при N_{\min} составит $\delta_{\min} = 7,8 \cdot 10^2$ микрон.

Таким образом, δ_{\min} составляет около 0,1 длины волны света, испускаемого осветительной аппаратурой.

Количество вымерзающих примесей, дающее еле заметный фон на фотографиях в 3 раза меньше, чем N_{\min} , т.е.

$$(N_{\min})_{\text{кр}} \approx 26 \text{ нсм}^3/\text{м}^2.$$

3-3. Диффузия примесей при продувке дьюара испаренным водородом. Расчёт необходимой скорости продувки.

В общем случае, когда газ в дьюаре движется вверх с некоторой

средней скоростью \bar{v} , определяемой как отношение объёмной скорости в данном сечении к площади поперечного сечения внутренней полости дьюара, местная скорость потока в разных частях поперечного сечения различна. У стенок она равна нулю и к центру сечения увеличивается до максимального значения.

При ламинарном потоке между двумя бесконечными пластинами или в круглой трубе эпюра скоростей имеет параболический вид и описывается уравнением

$$v_i = 2\bar{v} \left[1 - \left(\frac{z}{R} \right)^2 \right], \quad (39)$$

где v_i - местная скорость в сечении на расстоянии z от оси симметрии, \bar{v} - средняя скорость потока, R - радиус сечения или половина расстояния между пластинами.

Как показывают расчёты, при средней скорости потока водорода у крышки дьюара $\bar{v}_1 = 1 \cdot 10^{-4}$ м/сек для 100-см водородной пузырьковой камеры число Рейнольдса $Re = 0,5$.

Уравнение (22) и (25) получены для одномерного потока с постоянной скоростью в любой точке данного сечения потока. Эти уравнения могут быть использованы для приближенного решения нашей задачи. Рассмотрим для этого два крайних случая.

1) Предположим, что радиальной диффузии между отдельными элементарными струйками движущегося потока нет, т.е. каждая струйка по бокам как бы отделена непроницаемой и не тормозящей поток перегородкой.

2) Предположим, что во всех точках сечения потока, перпендикулярного вектору скорости v , концентрация примесей (азота) одинакова. Это соответствует предположению, что радиальная диффузия в направлениях, перпендикулярных вектору скорости потока,

неограничена.

Действительный случай лежит между указанными двумя крайними. По-видимому, чем больше отношение расчётной высоты H к размеру поперечного сечения потока, тем в большей мере действительный случай приближается ко второму крайнему случаю.

Для первого крайнего случая количество диффундирующих примесей (азота) $(N_1)_{\bar{v}_1}^I$ может быть определено как

$$(N_1)_{\bar{v}_1}^I = \sum_{i=1}^K F_i (N_1)_{(v_i)_1}^I, \quad (40)$$

где F_i - элементарная площадка сечения I внутренней полости дьюара, где скорость постоянна и равна $(v_i)_1$;

$(N_1)_{(v_i)_1}^I$ - элементарное количество примесей, диффундирующих через площадку F_i , где скорость постоянна и равна $(v_i)_1$

Здесь и в дальнейшем индексом I означает сечение у крышки дьюара, индексом 2 - сечение дьюара у верхней плоскости радиатора (Рис.4)

Для второго крайнего случая - радиальная диффузия неограничена) количество диффундирующих примесей (азота), может быть рассчитано прямо по уравнению (25). При этом значение скорости потока v_1 определяется средней его скоростью \bar{v}_1 . Действительно, поскольку (по предположению) концентрация примесей n_{10} в любой точке горизонтального сечения дьюара одинакова, то и градиент концентрации примесей по высоте дьюара $\frac{dn_{10}}{dz}$ во всех точках сечения одинаков. Тогда, используя уравнение (5.3) для суммарного количества примесей, диффундирующих через сечение F можно написать

$$(N_1)_{\bar{v}_1}^{II} = F_i (N)_{(v_i)_1} = -n \bar{D}_{12} \frac{dn_{10}}{dz} \sum F_i - n \bar{D}_T \frac{1}{T} \frac{dT}{dz} \sum F_i - n n_{10} \sum v_i F_i \quad (41)$$

Поскольку $\sum F_i = F$, а $\sum v_i F_i = \bar{v} F$, то нетрудно видеть, что уравнение (4I) приводится к виду уравнения (3), в котором под скоростью v подразумевается средняя скорость потока \bar{v} .

На рис. 6 представлена номограмма зависимостей удельного количества диффундирующего азота для одномерного потока смеси азот-водород в зависимости от скорости v_1 при различных концентрациях азота $(n_{IO})_1$ и $(n_{IO})_2$. Зависимости рассчитаны по уравнению 25. Значение параметров $(T_1, T_2, H, [\alpha(\infty)]_{n_{IO} \rightarrow 0}, \bar{R}_{T_1-T_2}^{\text{эксп}}, (D_{12})_1)$ взяты для условий работы 100-сантиметровой водородной камеры (3-I).

Из рис.6 видно, что даже при сравнительно высокой концентрации азота (примесей) $(n_{IO})_1$, достаточно иметь поток газа, обладающий небольшой скоростью v_1 , чтобы количество азота (примесей), диффундирующего к сечению 2 было снижено на несколько порядков. Оно может быть также сведено к нулю, если концентрация азота (примесей) в сечении 2 $(n_{IO})_2$ не равна нулю.

На рис.7 для сравнения представлены зависимости количества диффундирующего азота через единичное сечение (1 см^2) от средней скорости потока \bar{v} , для двух крайних случаев: радиальная диффузия в потоке отсутствует и радиальная диффузия в потоке неограничена. Кривые построены для условий 100-см водородной камеры. Распределение скоростей в сечении, перпендикулярном вектору скорости потока, принималось таким, какое устанавливается при ламинарном течении газа между бесконечными пластинами. Видно, что при небольших скоростях потока оба случая мало отличаются друг от друга.

При расчётах возникает вопрос о выборе расчётной высоты H , поскольку у крышки дьюара имеется сужение потока (рис.4)

(газ выходит из крышки через патрубок диаметром 300 мм). Очевидно, если в верхней части дьюара имеются мертвые зоны, где выноса примесей потоком нет, то необходимо это учитывать уменьшением расчётной высоты H . Известно / 21 /, что в области самых малых чисел Рейнольдса (Re от 0 до $10 + 30$) движение потока строго ламинарно. В подобном случае струи потока, расположенные у стенки, полностью обтекают сужение без образования мёртвых зон. Такой характер движения соответствует реальным условиям течения газа в дьюаре 100-см. камеры, и для расчётов в качестве H можно принимать расстояние между крышкой дьюара и верхней плоскостью радиатора.

Поскольку сечение дьюара имеет сложную форму, но в то же время приближается к вытянутому прямоугольнику, распределение скоростей в горизонтальном сечении дьюара будем определять как между двумя бесконечными пластинами.

Зададимся целью определить скорость продувки \bar{v}_1 , при которой еле заметный фон на иллюминаторе корпуса камеры появится, например, через 25 суток работы камеры. Еле заметный фон — такой фон, какой появился в первые сутки работы камеры без продувки. Другими словами, определим скорость потока \bar{v}_1 , при которой удельное количество примесей, диффундирующих к сечению 2 уменьшится в 25 раз по сравнению со случаем, когда $\bar{v}_1 = 0$.

Из рис.7 для $(n_{IO})_1 = 10^{-5}$ и $(n_{IO})_2 = 0$ находим
 при $\bar{v}_1 = 0$ $N_1 = 5,7 \cdot 10^{-8}$ нсм³/см² сек;
 при $\bar{v}_1 = 1,4 \cdot 10^{-2}$ см/сек $N_1 \approx 6 \cdot 10^{-9}$ нсм³/см² сек;
 при $\bar{v}_1 = 2 \cdot 10^{-2}$ см/сек $N_1 \approx 2 \cdot 10^{-9}$ нсм³/см² сек.

Таким образом, скорость продувки должна составлять $\bar{v}_1 \approx 2 \cdot 10^{-2}$ см/сек

Приведенные количества диффундирующих примесей (азота) получены при условии, что концентрация примесей в сечении 1 $(n_{IO})_1$

постоянна. В действительности, когда имеется продувка, происходит вынос примесей из дьюара, и концентрация $(n_{10})_I$ с увеличением скорости продувки уменьшается. Количество диффундирующих примесей при данной скорости потока \bar{v}_1 уменьшится пропорционально уменьшению концентрации примесей $(n_{10})_I$.

При установившемся состоянии баланс примесей для сечения I выразим в виде

$$(N_1)_{\bar{v}_1=0} = (N_1)_{\bar{v}_1}^{\uparrow} + (N_1)_{\bar{v}_1}^{\downarrow}, \quad (42)$$

где $(N_1)_{\bar{v}_1=0}$ - количество примесей, поступающих в газ, находящийся в дьюаре (принимается равным количеству примесей, диффундирующих при $\bar{v}_1 = 0$ к сечению 2 камеры (верхняя плоскость радиатора);

$(N_1)_{\bar{v}_1}^{\uparrow}$ - количество примесей, уносимое из дьюара с загрязненным газом, при продувке дьюара со скоростью \bar{v}_1 ;

$(N_1)_{\bar{v}_1}^{\downarrow}$ - количество примесей, диффундирующих к сечению 2, при продувке дьюара со скоростью \bar{v}_1 .

Оценим концентрацию примесей $[(n_{10})_1]_{\bar{v}_1}$ при некоторой средней скорости потока \bar{v}_1 следующим образом:

$$[(n_{10})_1]_{\bar{v}_1} = \frac{(N_1)_{\bar{v}_1=0} - (N_1)_{\bar{v}_1}^{\downarrow}}{\bar{v}_1 \frac{P_1}{P_0} \frac{T_0}{T_1}} \quad (43)$$

Здесь P_I и T_I - рабочее давление в дьюаре и температура водорода у крышки дьюара;

P_0 и T_0 - давление и температура при нормальных условиях;

$(N_1)_{\bar{v}_1=0}$ и $(N_1)_{\bar{v}_1}^{\downarrow}$ - то же, что и в

уравнении (42).

При работе 100-см водородной камеры скорость \bar{v}_1 поддерживается постоянной и равной $1,4 \cdot 10^{-2}$ см/сек. Как уже упоминалось, концентрация примесей $(n_{10})_I$ при работе камеры без продувки составляла 10^{-5} объёмных долей. При этой концентрации и $\bar{v}_1 = 1,4 \cdot 10^{-2}$ см/сек количество диффундирующих примесей к сечению 2 (из рис.7)

$(N_1)_{\bar{v}_1=1,4 \cdot 10^{-2}} \downarrow \approx 6 \cdot 10^{-9}$ нсм³/см²сек. Поскольку $(N_1)_{\bar{v}_1=1,4 \cdot 10^{-2}} \downarrow$ значительно меньше $(N_1)_{\bar{v}=0} = 5,7 \cdot 10^{-8} \frac{\text{нсм}^3}{\text{см}^2 \text{сек}}$, для оценки концентрации $[(n_{10})_1]_{\bar{v}_1=1,4 \cdot 10^{-2}}$ достаточно первого приближения, т.е. в уравнение (43) подставить значение

$(N_1)_{\bar{v}_1=1,4 \cdot 10^{-2}} \downarrow$ при концентрации $(n_{10})_I = 10^{-5}$, тогда получим:

$$[(n_{10})_1]_{\bar{v}_1=1,4 \cdot 10^{-2}} = \frac{5,7 \cdot 10^{-8} - 6 \cdot 10^{-9}}{1,4 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{1,17}{1,01} \cdot \frac{273}{293}} =$$

$= 3,4 \cdot 10^{-6}$ объёмных долей.

Замеренная концентрация примесей у крышки дьюара при работе камеры с продувкой со скоростью $\bar{v}_1 = 1,4 \cdot 10^{-2}$ см/сек составляла $[(n_{10})_1]_{\bar{v}_1=1,4 \cdot 10^{-2}} \approx 3 \cdot 10^{-6}$ объёмных долей и хорошо согласуется с расчётной.

Таким образом, расчётное количество примесей, диффундирующих к сечению 2 при $\bar{v}_1 = 1,4 \cdot 10^{-2}$ см/сек и $(n_{10})_I = 3,4 \cdot 10^{-6}$ объёмных долей составит

$$N_1 \downarrow = 6 \cdot 10^{-9} \frac{3,4 \cdot 10^{-6}}{10^{-5}} \approx 2 \cdot 10^{-9} \frac{\text{нсм}^3}{\text{см}^2 \text{сек}}$$

т.е. уменьшится примерно в 28 раз по сравнению со случаем, когда

ЛИТЕРАТУРА

1. Н.Я.Басалаева. ЖТФ, том. XXIII, № 5, II02, 1958.
2. Р.Бэррер. Диффузия в твердых телах. М, 1948.
3. Е.И.Дьячков, А.Г.Зельдович. Авторское свидетельство СССР № 309329. Открытия, изобретения и товарные знаки, № 22, 1971.
4. Е.И.Дьячков, А.Г.Зельдович. Авторское свидетельство СССР № 283422, опубликовано 6.X.1970. Бюллетень, № 31, 1970.
5. С.Чепмен, Т.Каулинг. Математическая теория неоднородных газов. И.Л. 1960.
6. Атомные и молекулярные процессы под ред. Д.Бейтса. М., Изд., Мир, 1964.
7. В.Ф.Вышенская, Н.Д.Косов. Стр. 181 в кн. Тепло и массоперенос т.1, АН БССР, Минск, 1959.
8. П.Е.Суетин. Стр. 188 в кн. Тепло и массоперенос т.1, АН БССР, Минск, 1959.
9. К.Э.Грю, Т.Л.Иббс. Термическая диффузия в газах. М.,Гос.изд. технико-теор.лит, 1956.
10. E.W. Becker. Zeits. Naturforsch., 5a, 457 (1950).
11. Дж.Гирифельдер, Ч.Кертис, Р.Берд. Молекулярная теория газов и жидкостей. М., Изд. ин.лит, 1961.
12. K.E. Grew. Proc. Roy. Soc., 62, 655 (1949).
13. A.van Itterbeek, O.van Raemel, J.van Lierde. Physica, 13, 231 (1947).
14. A.de Troyer, A.van Itterbeek, G.J.van den Berg. Physica, 16, 669 (1950).
15. T.L.Ibbs, K.E.Grew, A.A.Hirst. Proc. Phys. Soc., 41, 456 (1929).
16. L. Waldman. Zeits. Phys., 124, 2 (1947).

17. T.L. Ibbs, L. Underwood. Proc. Phys. Soc., 39, 227 (1927).
18. K.E. Grew, B.E. Atkins. Proc. Phys. Soc, 48, 415 (1936).
19. К.Н. Зиновьева. Заводская лаборатория, 21, № I, 30 (1955)
20. Вопросы глубокого охлаждения. Сборник статей под ред.
М.П. Малкова, М, И-Л ., 1961.
21. П.П. Кремлевский. Расходомеры. М-Л, ГНТИ, 1955.

СОДЕРЖАНИЕ.

Стр.

Аннотация.....	2
§ 1. Загрязнение наружной поверхности иллюминатора корпуса камеры вымерзающими примесями. Защита от загрязнений путем непрерывной продувки дьюара чистым неконденсирующимся газом.....	3
§ 2. Концентрационная и термическая диффузия примесей в одномерном ламинарном потоке газа.....	7
2-1. Бинарная смесь.....	7
2-2. Многокомпонентная смесь.....	21
§ 3. Диффузия вымерзающих примесей к наружной поверхности иллюминатора корпуса 100-см водородной камеры.....	22
3-1. Предпосылки к расчёту.....	22
3-2. Диффузия примесей, когда водород в дьюаре неподвижен. Количество вымерзающих примесей, дающее фон на фотографиях.....	24
3-3. Диффузия примесей при продувке дьюара испаренным водородом. Расчёт необходимой скорости продувки.....	26
Литература.....	34
Оглавление.....	36

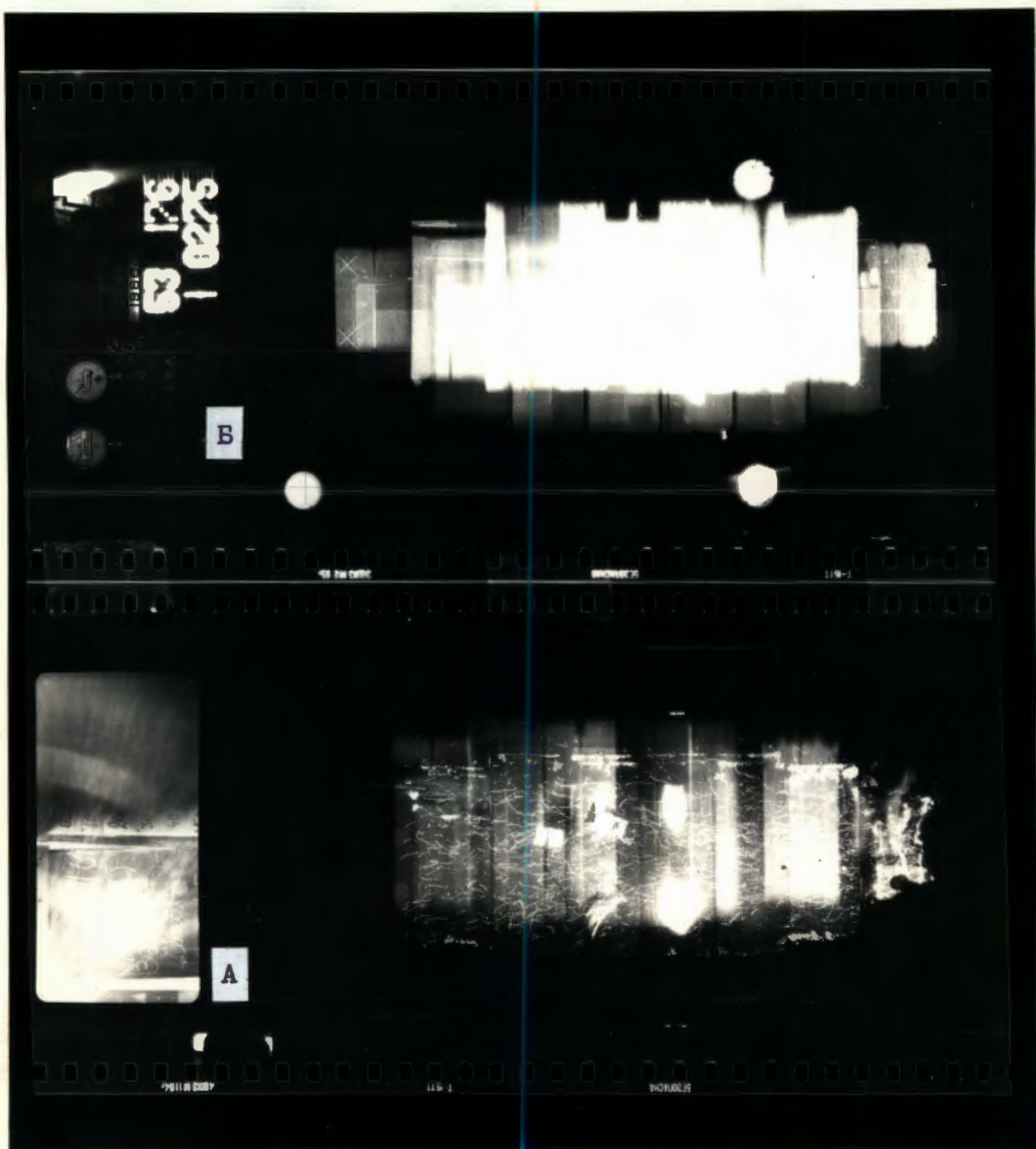


Рис. I. Первые фотоснимки со 100-см водородной пузырьковой камеры.
Тренировка камеры перед охлаждением и продувка внутренней полости дьюара при работе не проводилась.
А и Б- соответственно через 1 и 4 суток работы камеры после охлаждения её до рабочей температуры. На фотографии А фон уже значительный.

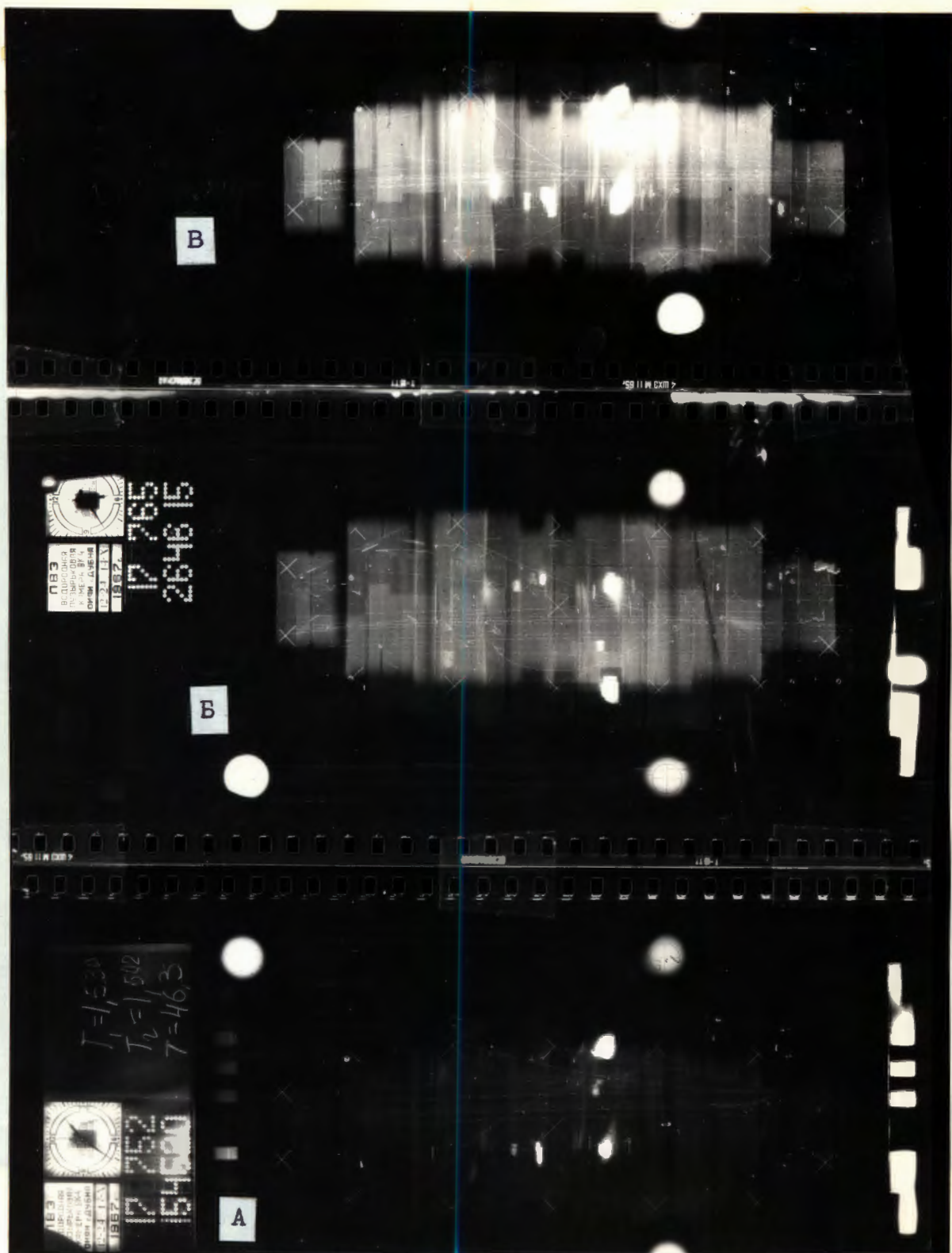


Рис.2. Фотоснимки со 100-см водородной пузырьковой камеры. Была тренировка камеры откачкой с периодическим заполнением её чистым водородом (в течение 300 часов перед охлаждением). Продувка внутренней полости дьюара при работе не проводилась. А, Б и В- соответственно через 1, 3 и 5 суток работы камеры после охлаждения её до рабочей температуры. Заметно постоянное нарастание фона.

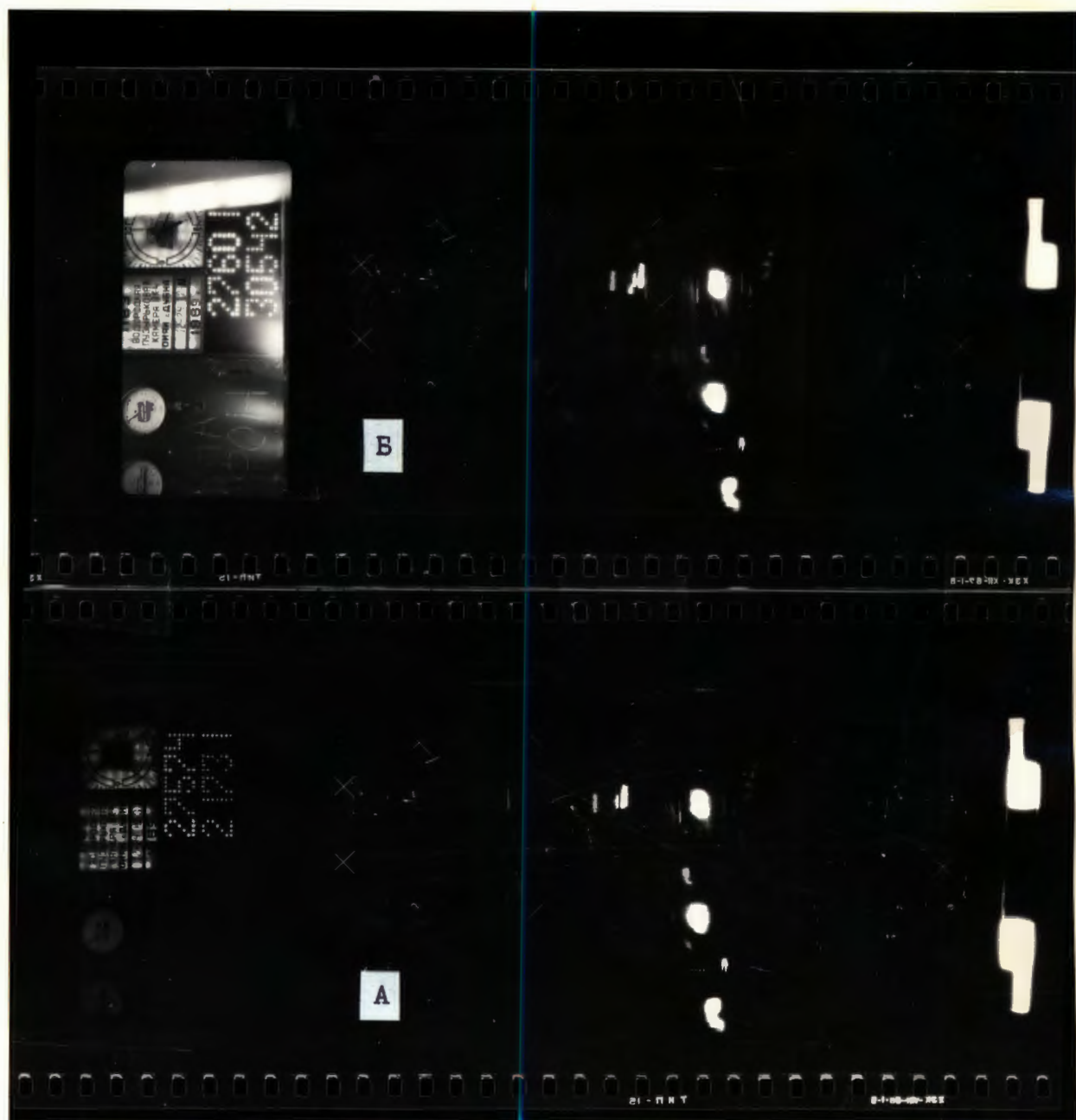


Рис.3. Фотоснимки со 100-см водородной пузырьковой камеры. Перед охлаждением камеры проводилась тренировка её откачкой с периодическим заполнением её чистым водородом (в течение 8-10 часов). При работе камеры осуществлялась постоянная продувка внутренней полости дьюара испаренным водородом со скоростью $\bar{v}_d = 1,4 \cdot 10^{-2}$ см/сек. (скорость в сечении у крышки дьюара) А и Б-соответственно через 1 и 24 суток работы камеры после охлаждения её до рабочей температуры. На фотографии Б наблюдается еле заметный фон.

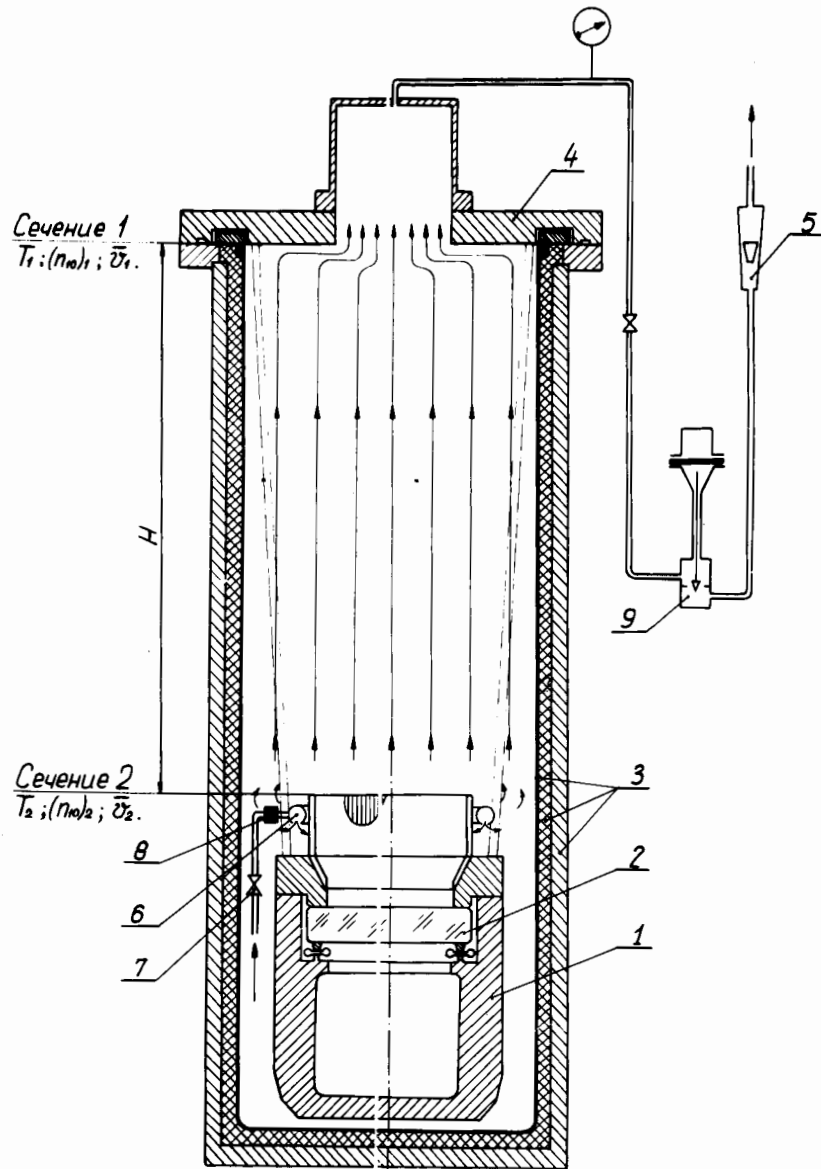


Рис.4. Схема способа защиты поверхностей низкотемпературных сосудов от загрязнения отвердевшими газами путем организации потока чистого неконденсирующегося газа. (На примере защиты иллюминатора водородной пузырьковой камеры с дьюарной системой теплоизоляции).

1-корпус камеры; 2- иллюминатор; 3-дьюар; 4-крышка дьюара; 5-ротаметр; 6-перфорированная трубка; 7-регулирующий вентиль; 8-фильтр; 9-регулятор давления.

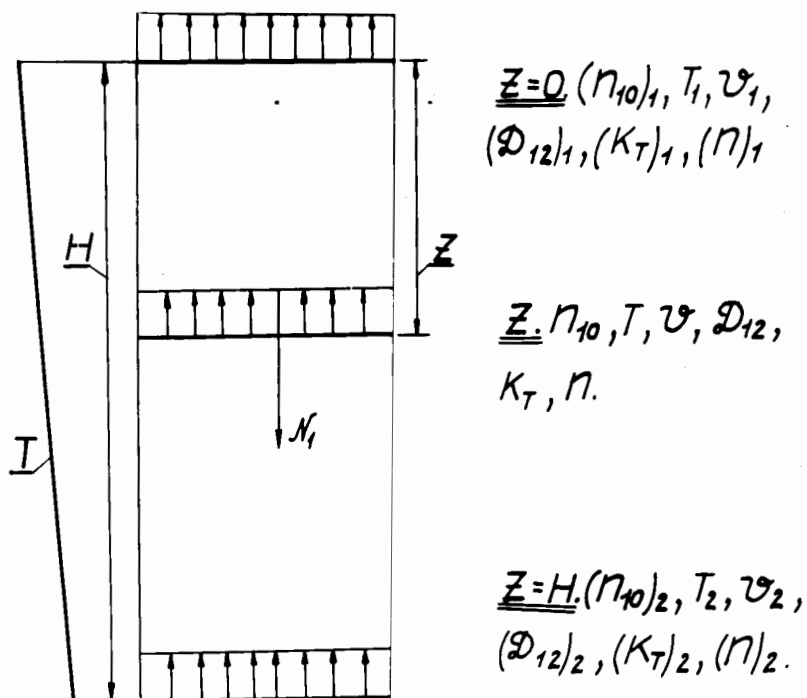


Рис.5. Схема к задаче концентрационной и термической диффузии в одномерном ламинарном потоке бинарной смеси.

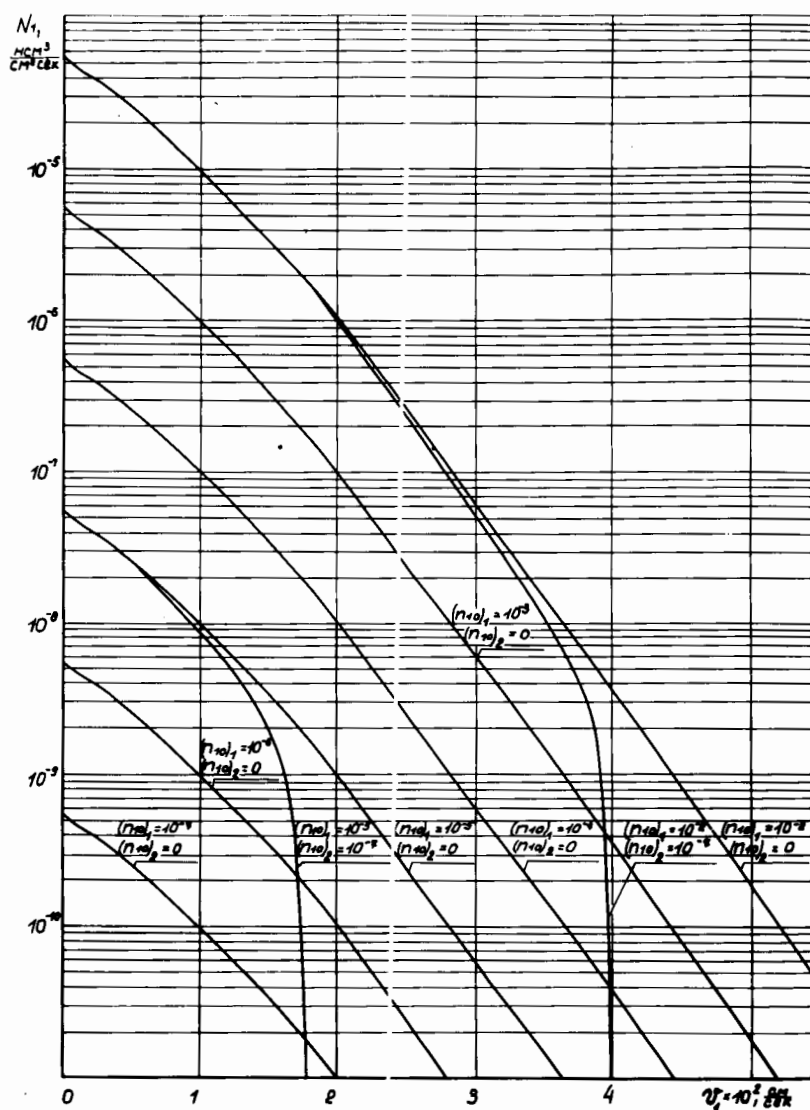


Рис.6. Номограмма зависимостей удельного количества диффундирующего азота N_1 для одномерного потока в смеси азот-водород в зависимости от скорости потока в сечении I U_1 при различных концентрациях азота в сечениях I и 2 $(n_{10})_I$ и $(n_{10})_2$.

Рассчитана по уравнению 25 для условий работы 100-см водородной пузырьковой камеры. $T_1=293^{\circ}\text{K}$; $T_2=28^{\circ}\text{K}$;

$H=93$ см; $[\alpha(\infty)]_{n_{10} \rightarrow 0} = 1,105$;

$\bar{R}_{T_1-T_2}^{\text{экср}} = 0,42$; $(D_{12})_I = 0,67$ см²/сек, давление смеси $p = 1,15 \cdot 10^5$ н/м², $w = -0,465$.

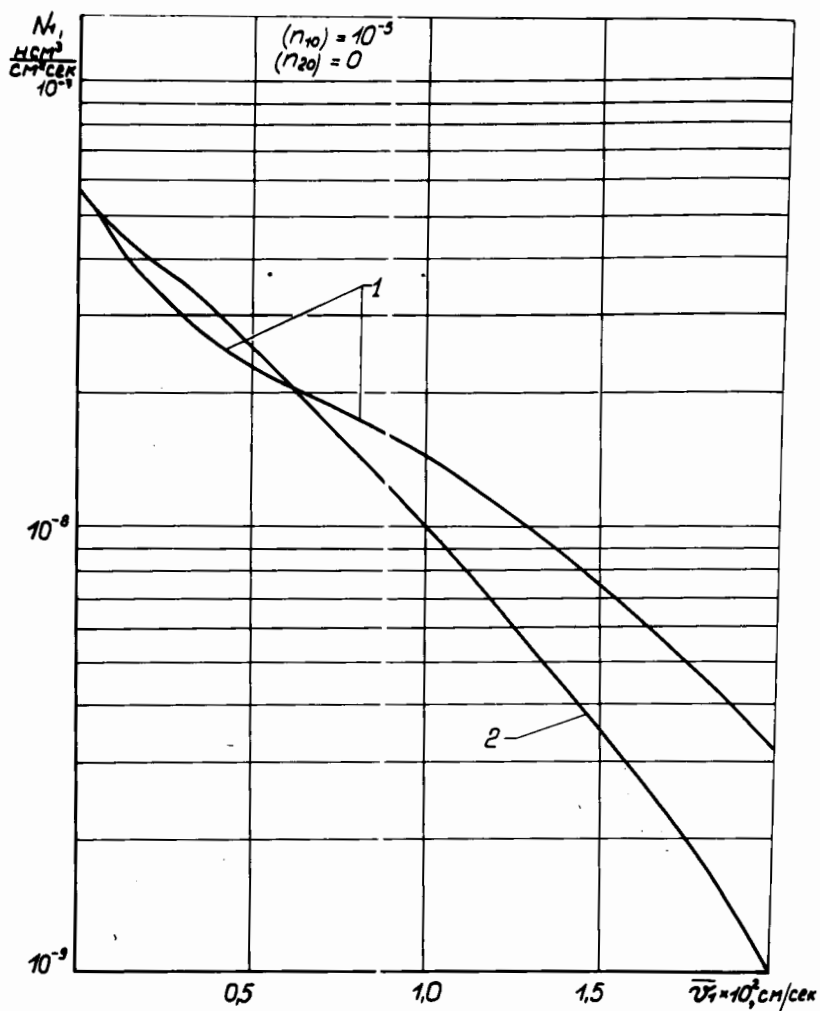


Рис.7. Удельное количество примесей диффундирующих к иллюминатору корпуса 100-см водородной пузырьковой камеры в зависимости от средней скорости потока в дьюаре в сечении I \bar{v}_1 .
 I- радиальная диффузия в потоке отсутствует;
 II- радиальная диффузия в потоке неограничена.