

33  
И Н С Т И Т У Т  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН С С С Р

ПРЕПРИНТ 336

А.Г.Гройсман, Г.И.Димов, О.Я.Савченко

КОНДЕНСАЦИЯ ГАЗА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

Новосибирск

1969

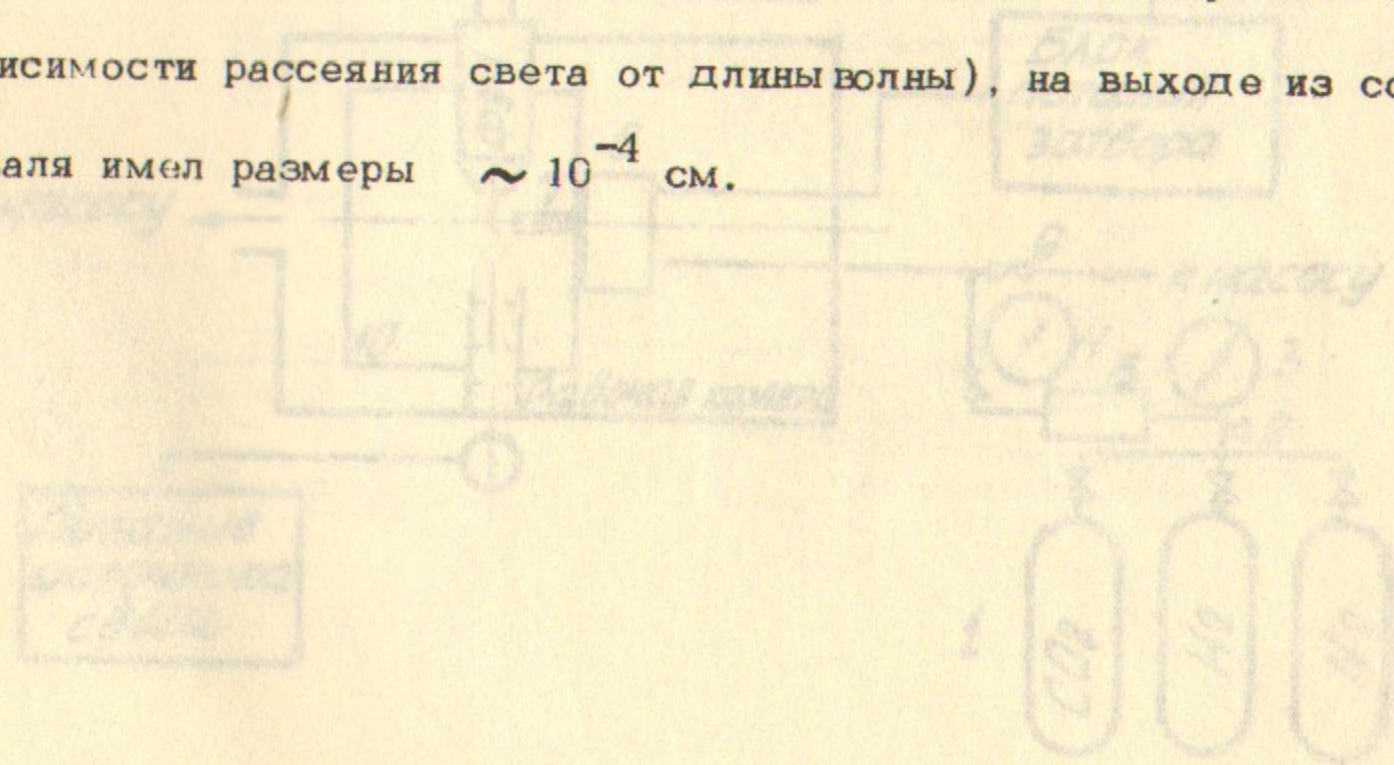


А.Г.Гройсман, Г.И.Димов, О.Я.Савченко

## КОНДЕНСАЦИЯ ГАЗА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

### А Н Н О Т А Ц И Я

Экспериментально обнаружена конденсация водорода в сверхзвуковой струе, формируемой соплом Лавала. Изучались характер конденсации  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$  и смесей  $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2 + \text{H}_2$ . Было найдено, что число центров конденсации в чистых газах экспоненциально зависит от начальных давлений. В смесях  $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2 + \text{H}_2$  сжижения  $\text{CO}_2$  (вплоть до концентраций  $\text{CO}_2 \sim 15\%$ ) было почти полное. Диаметр капель концентрата (измеренный по зависимости рассеяния света от длины волны), на выходе из сопла Лавала имел размеры  $\sim 10^{-4}$  см.





А Н Н О Т А Ц И Я

Экспериментально исследована конденсация пара в сверхзвуковом потоке. В работе описывается установка, позволяющая изучать процесс конденсации в сверхзвуковом потоке. В работе описывается установка, позволяющая изучать процесс конденсации в сверхзвуковом потоке.

Значительное количество экспериментальных работ было выполнено по конденсации воды в сверхзвуковом потоке влажного воздуха /1/. Что касается чистых газов, изучение конденсации было проведено лишь в азоте /2/. В этой работе был определен момент наступления конденсации азота с начальными параметрами: температура  $290^{\circ}\text{K}$ , давление 8 - 16 атм. В предлагаемом препринте описываются исследования конденсации углекислого газа, азота, водорода и смесей этих газов в сверхзвуковом потоке, формируемом соплом Лаваля.

1. Экспериментальное оборудование

Экспериментальное исследование конденсации газов в сверхзвуковом потоке производилось на установке, описанной в /3/. Её схема приведена на рис.1.

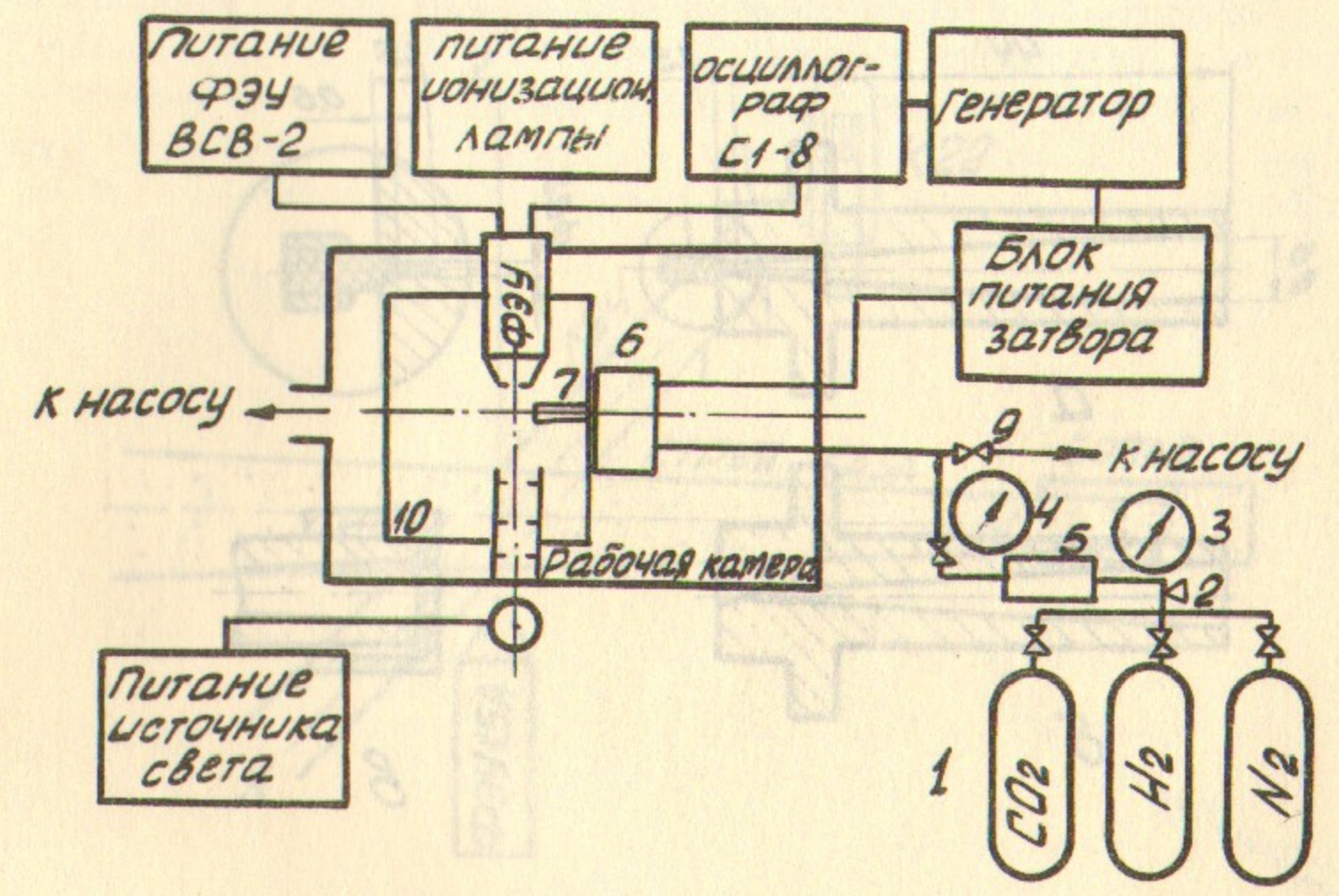


Рис.1



Газ из баллонов 1 через охладитель 5 поступает в камеру 6 с быстродействующим электродинамическим затвором /5/, к которому прикреплено сопло 7 (рис.2). Камера с затвором помещена в рабочий вакуумный объем 8. В рабочем объеме находятся также система зачерненных экранов 10, фотоэлектронный умножитель 11 и коллиматор света 12. В качестве рабочего вещества использовался баллонный газ: углекислый газ при давлении 45 атм, азот при давлении 80 атм и водород при давлении 110 атм. При предельном давлении водорода используемое сопло Лавала давало возможность получить струю на выходе с поперечным сечением 2,5 мм и плотностью  $10^{19}$  мол/см. /3/. В качестве источника света использовалась кинолампа К-22, приемником

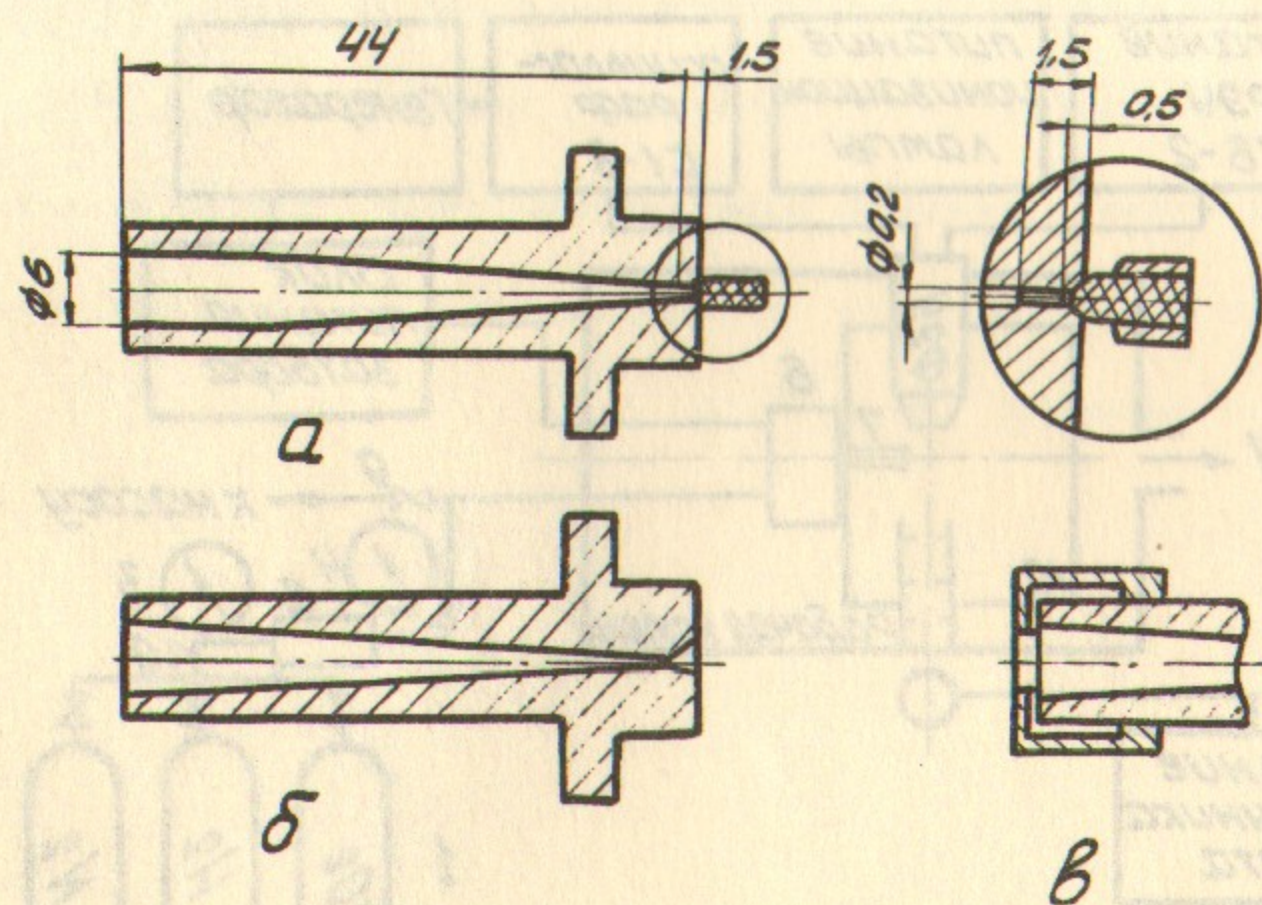


Рис.2.

рассеянного света служил фотоэлектронный умножитель ФЭУ-15А. Для исследования зависимости рассеяния света от длины волны использовались следующие светофильтры: УФС-4, ФС-1, Hg-436, СЗС-7, ШЗС-1, КС-14. Их спектральные характеристики приведены в конце текста препринта.

## 2. Постановка эксперимента

Конденсация газа на выходе из сопла Лавала обнаруживалась по свету, который рассеивался на конденсированной фазе. Ось струи газа, луч света от кинолампы и ось ФЭУ, который фиксировал рассеянный свет от струи, образовывали ортогональный репер (рис.3).

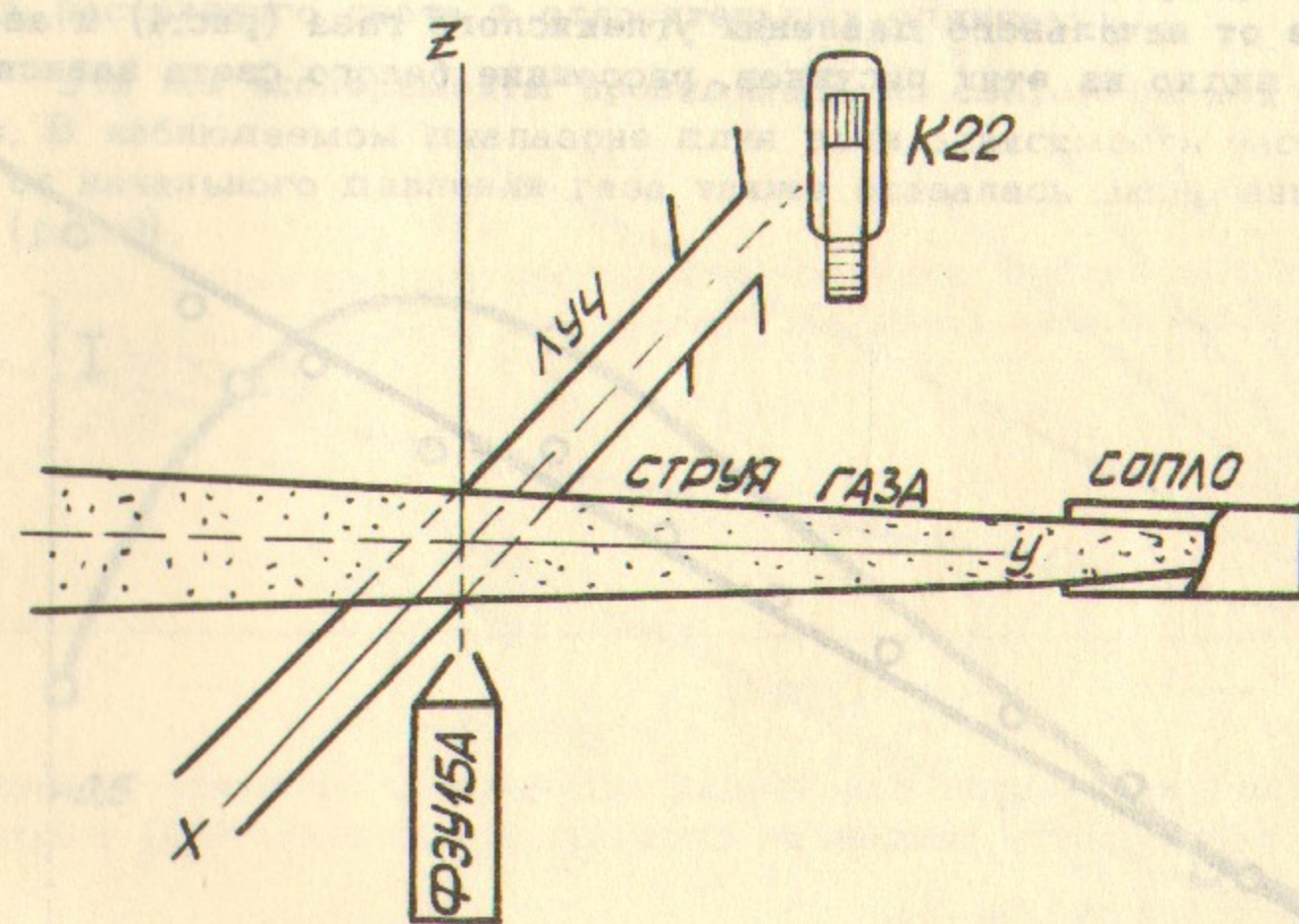


Рис.3.



Для уменьшения фона от света, рассеянного другими объектами все детали внутри рабочего объема были почернены. Электрические наводки на ФЭУ, вызываемые токами в электродинамическом затворе устранялись экранировкой ФЭУ, экранировкой затвора, электрической изоляцией затвора от камеры.

В эксперименте измерялась амплитуда сигнала света, рассеянного на конденсированном газе. Были сняты зависимости рассеяния света от давления газа и от длины волны. Абсолютное значение интенсивности рассеянного света оценивалось сравнением амплитуды сигнала с ФЭУ, вызываемого рассеянным на струе светом, с амплитудой сигнала, который вызывается никелевой проволокой известного диаметра, протянутой в направлении оси сопла Лаваля.

### 3. Результаты эксперимента

На рисунках 4-5 изображены зависимости рассеяния света на струе от начального давления углекислого газа (рис.4) и азота.

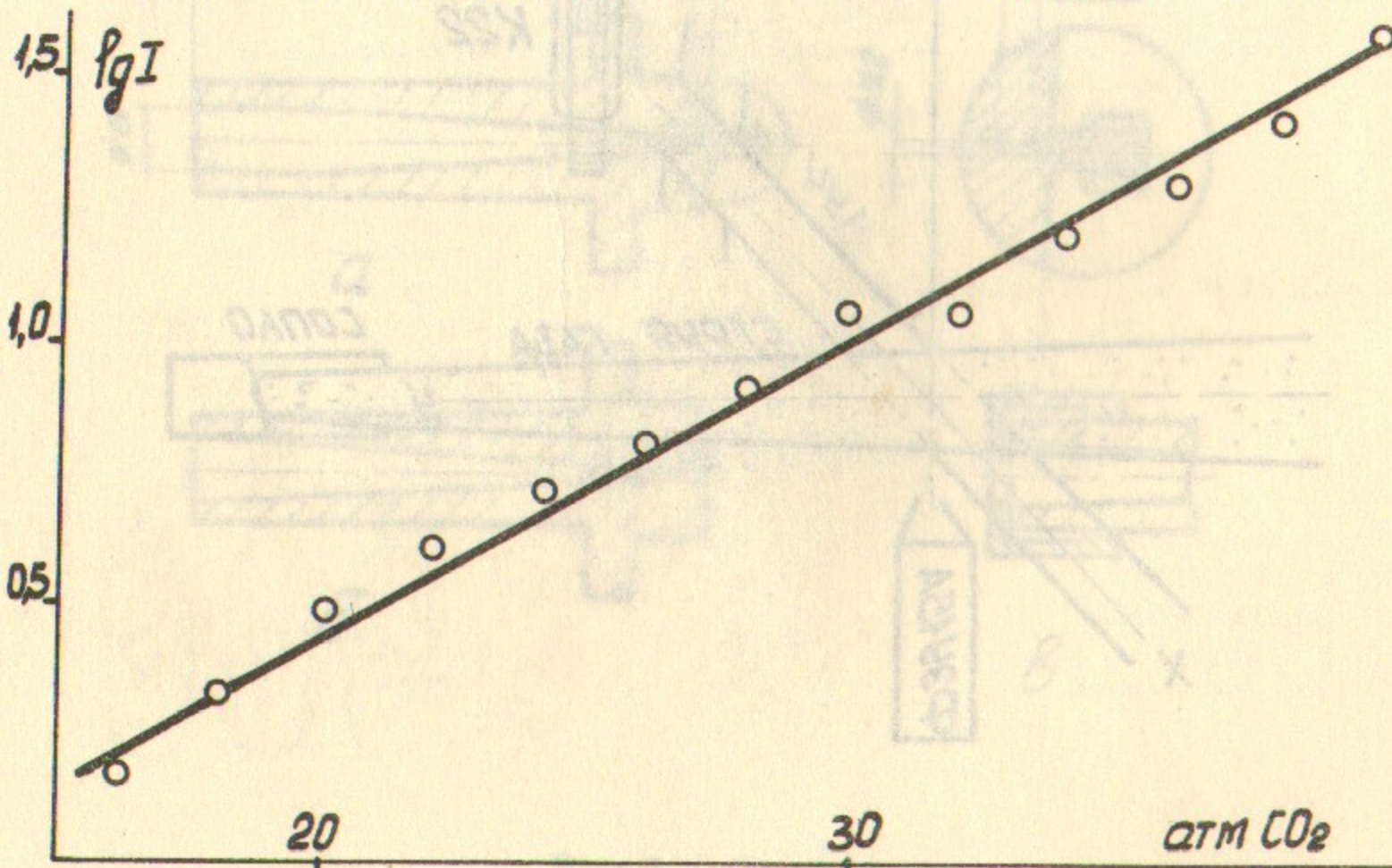


Рис.4.

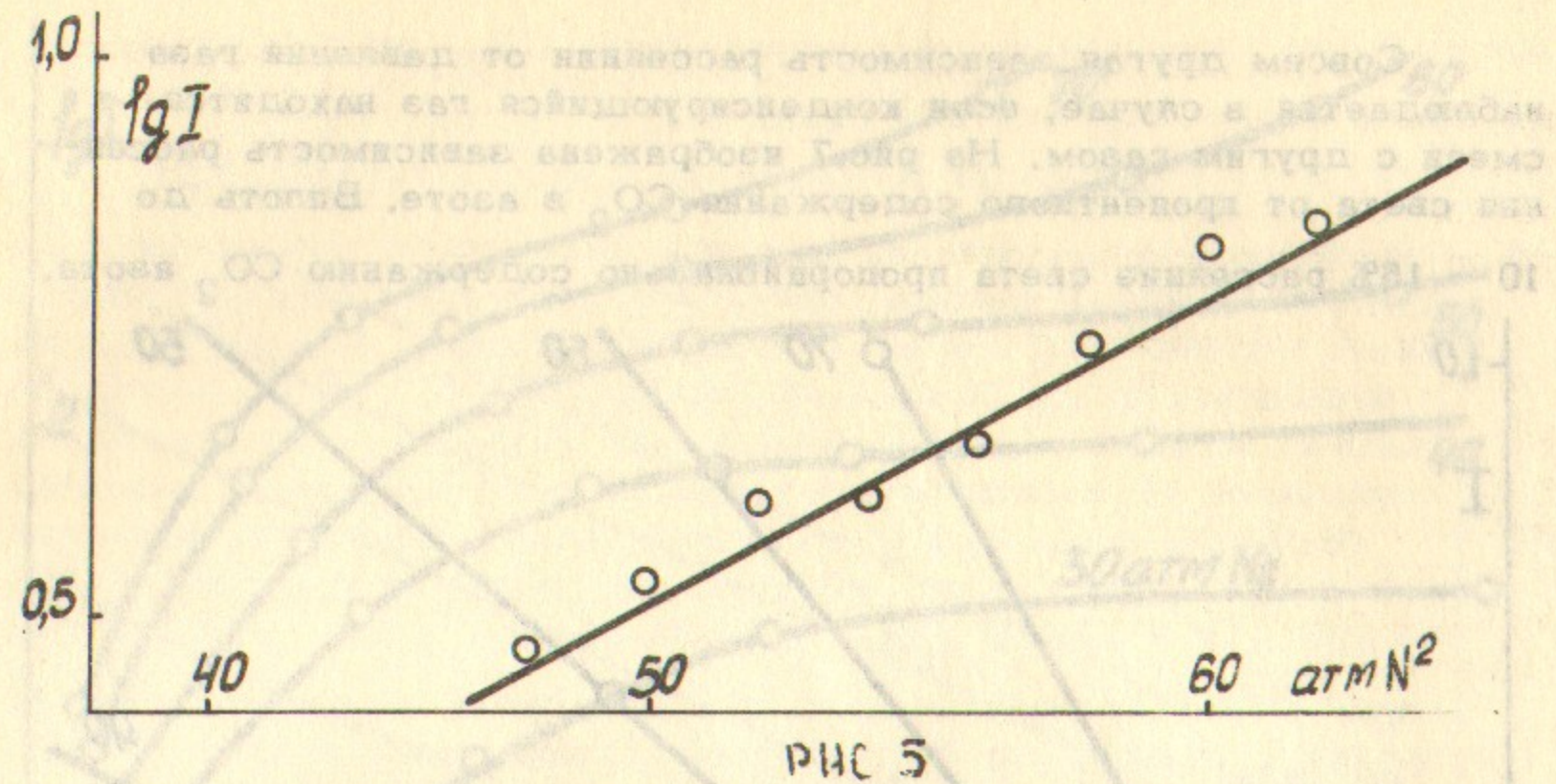


Рис.5

экспоненциально от начального давления газа ( I - интенсивность рассеянного света в относительных единицах).

Эти же эксперименты проводились со светом разных длин волн. В наблюдаемом диапазоне длин волн зависимость рассеяния от начального давления газа также оказалась экспоненциальной (рис.6).

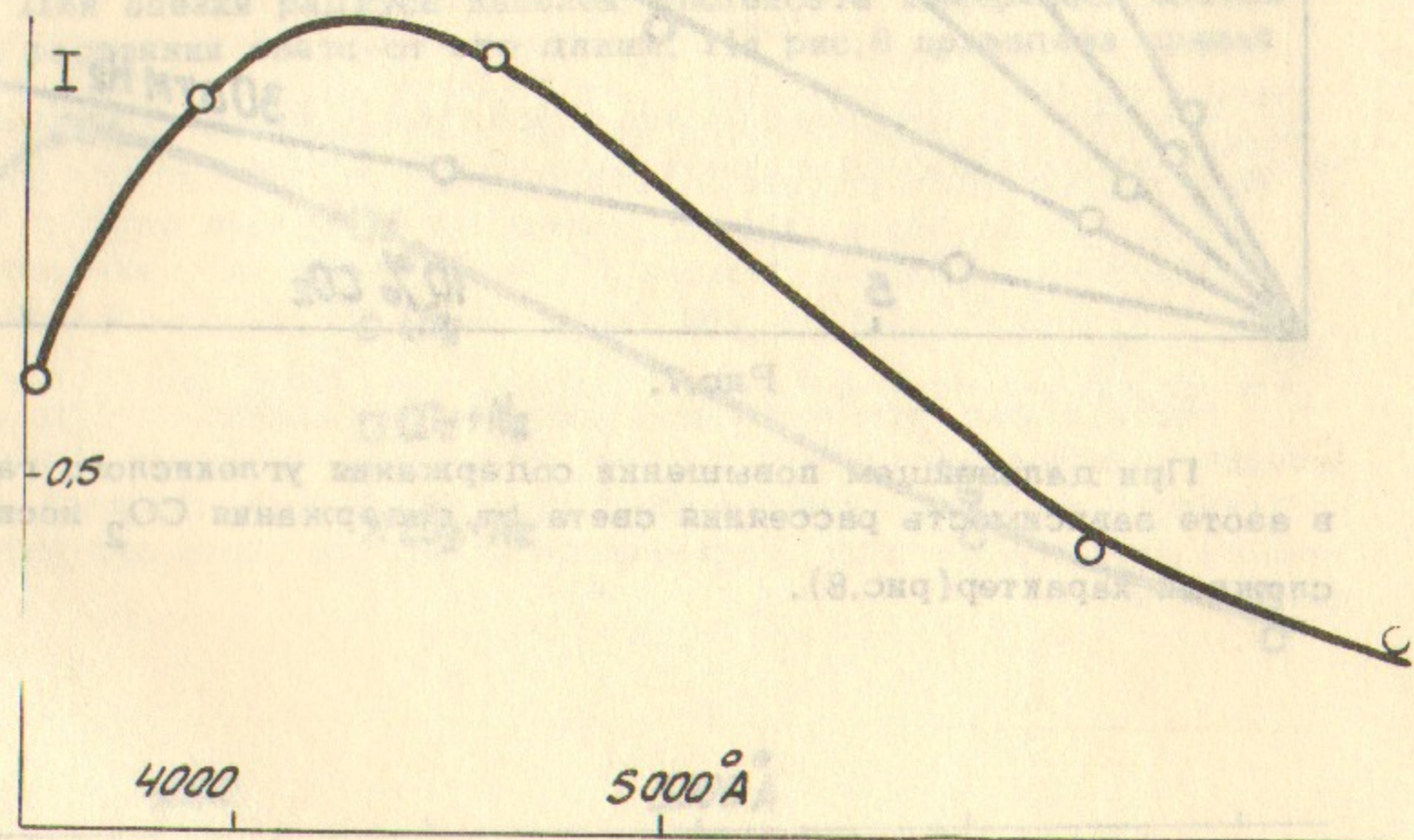


Рис.6.



Совсем другая зависимость рассеяния от давления газа наблюдается в случае, если конденсирующийся газ находится в смеси с другим газом. На рис.7 изображена зависимость рассеяния света от процентного содержания  $\text{CO}_2$  в азоте. Вплоть до 10 - 15% рассеяние света пропорционально содержанию  $\text{CO}_2$  азота.

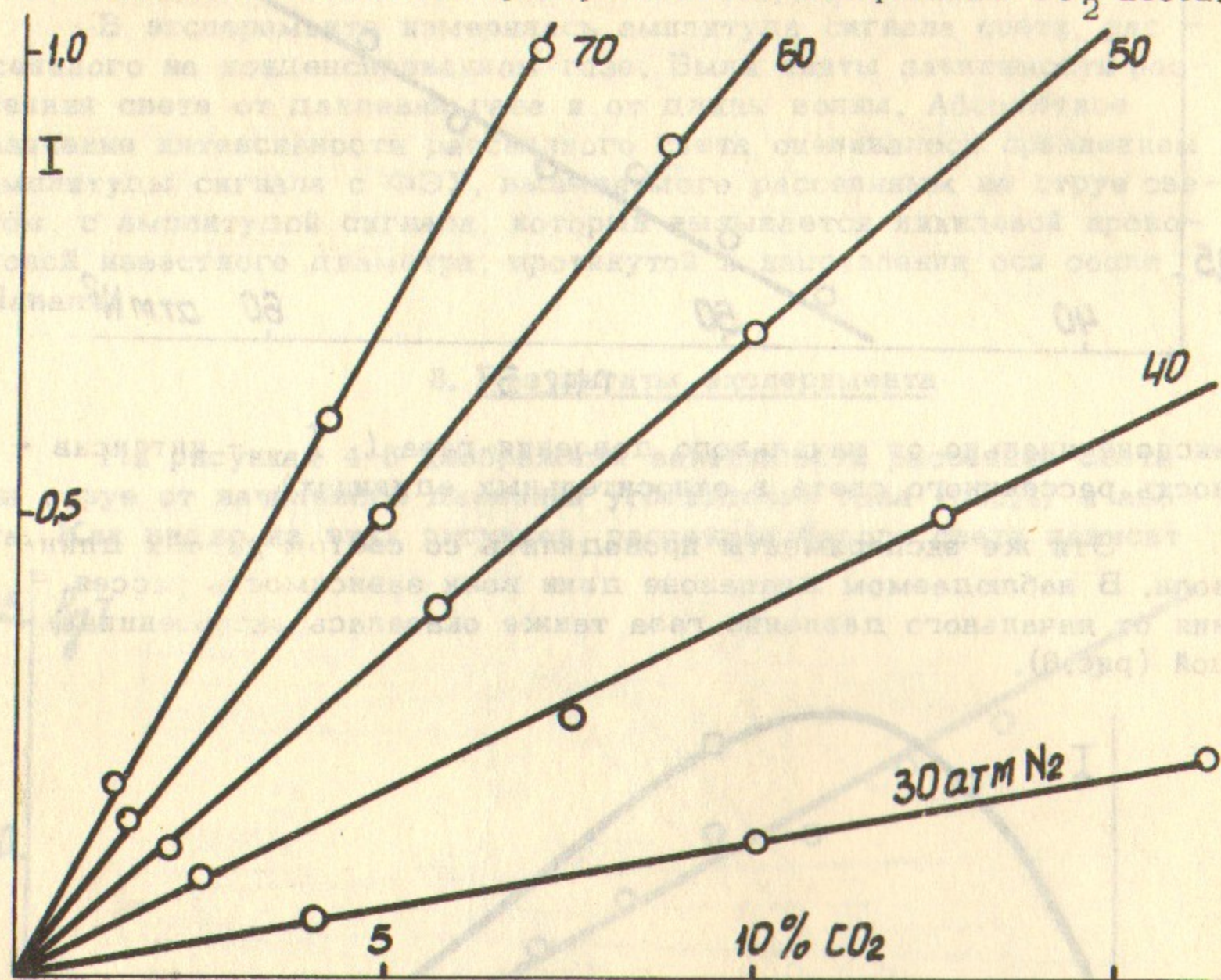


Рис.7.

При дальнейшем повышении содержания углекислого газа в азоте зависимость рассеяния света от содержания  $\text{CO}_2$  носит сложный характер (рис.8).

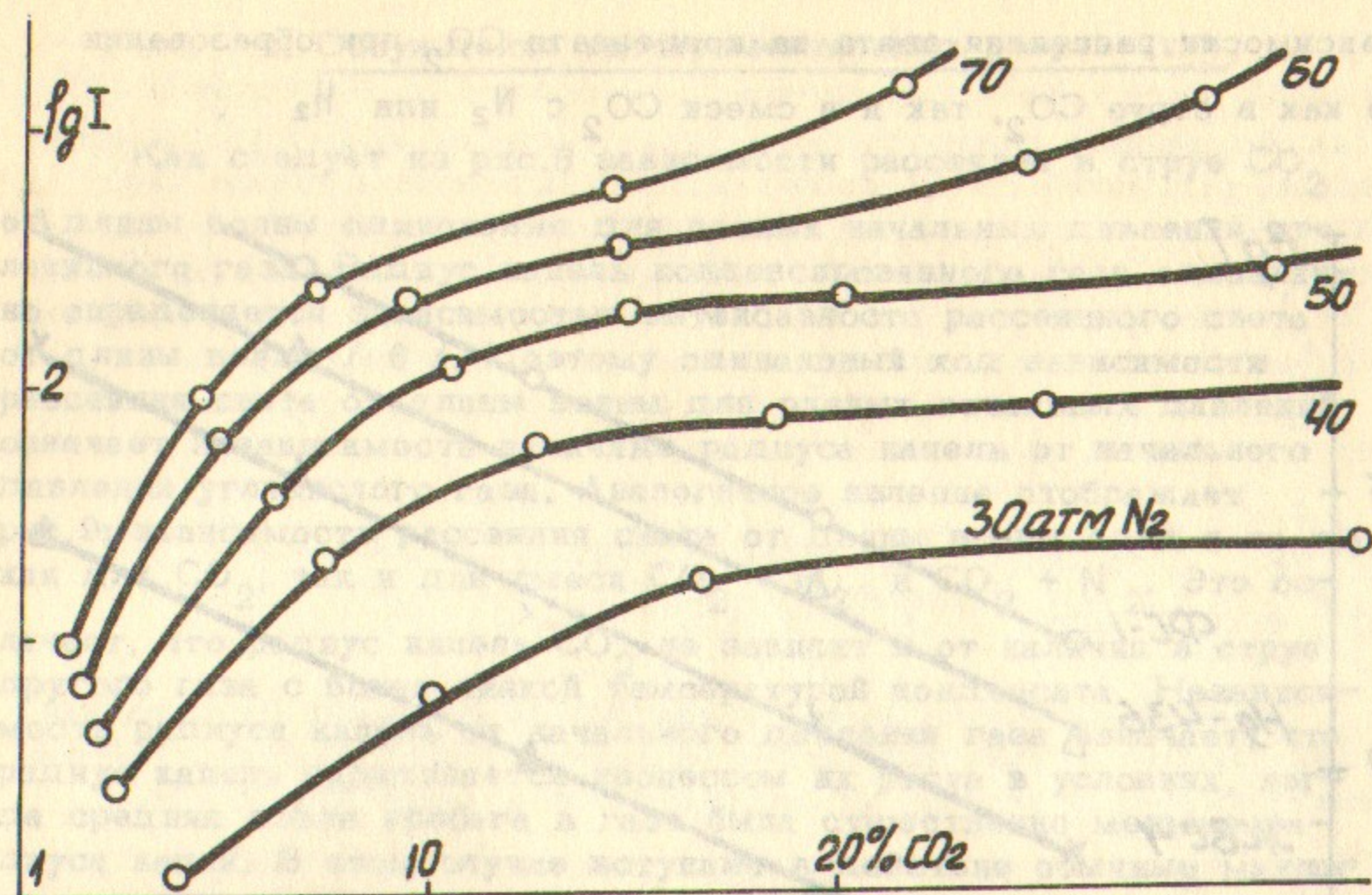


Рис.8.

Для оценки радиуса капелек конденсата измерялась зависимость рассеяния света от его длины. На рис.9 приведена кривая

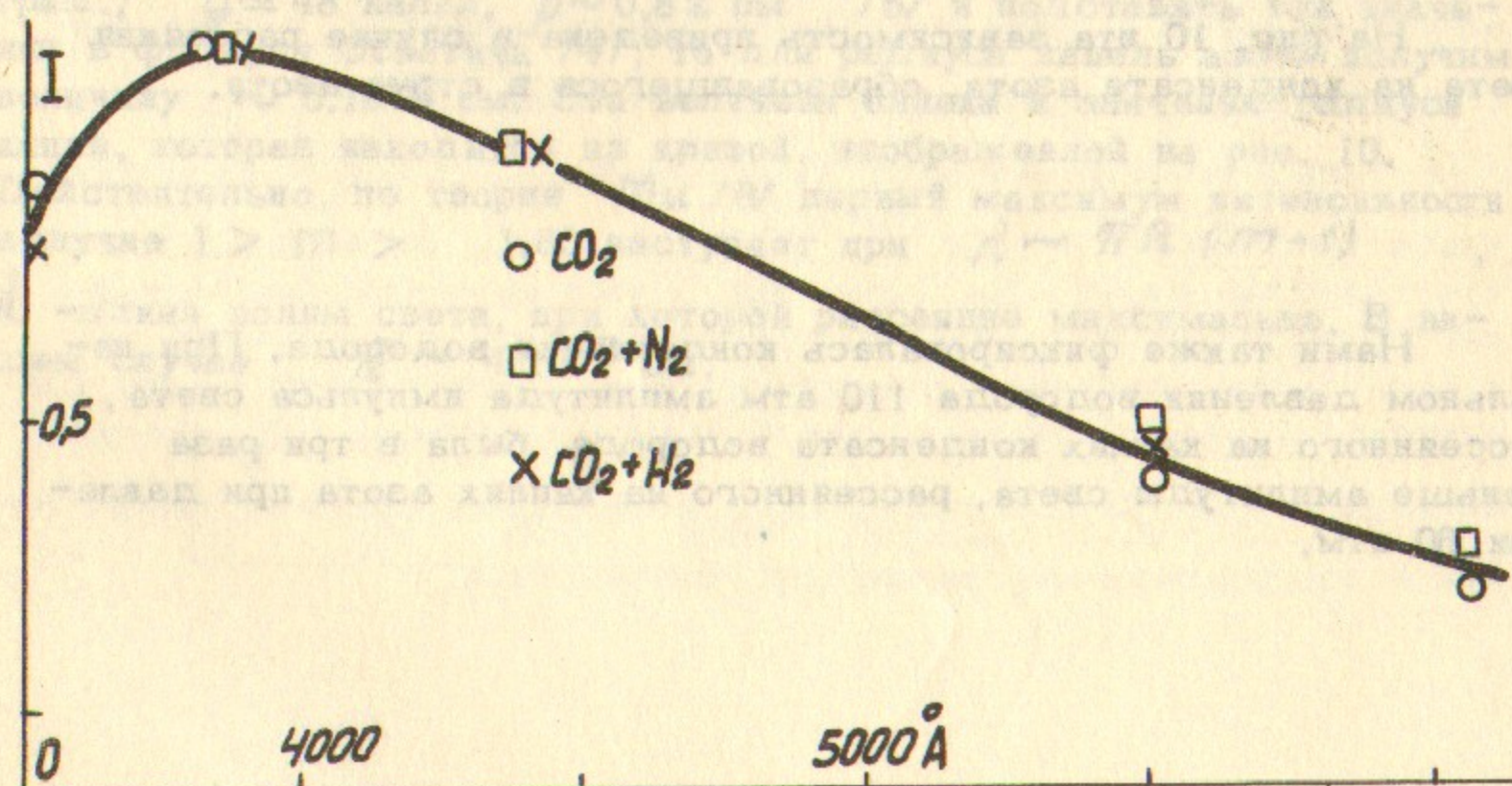


Рис.9.



зависимости рассеяния света на конденсате  $\text{CO}_2$  при образовании его как в струе  $\text{CO}_2$ , так и в смеси  $\text{CO}_2$  с  $\text{N}_2$  или  $\text{H}_2$ .

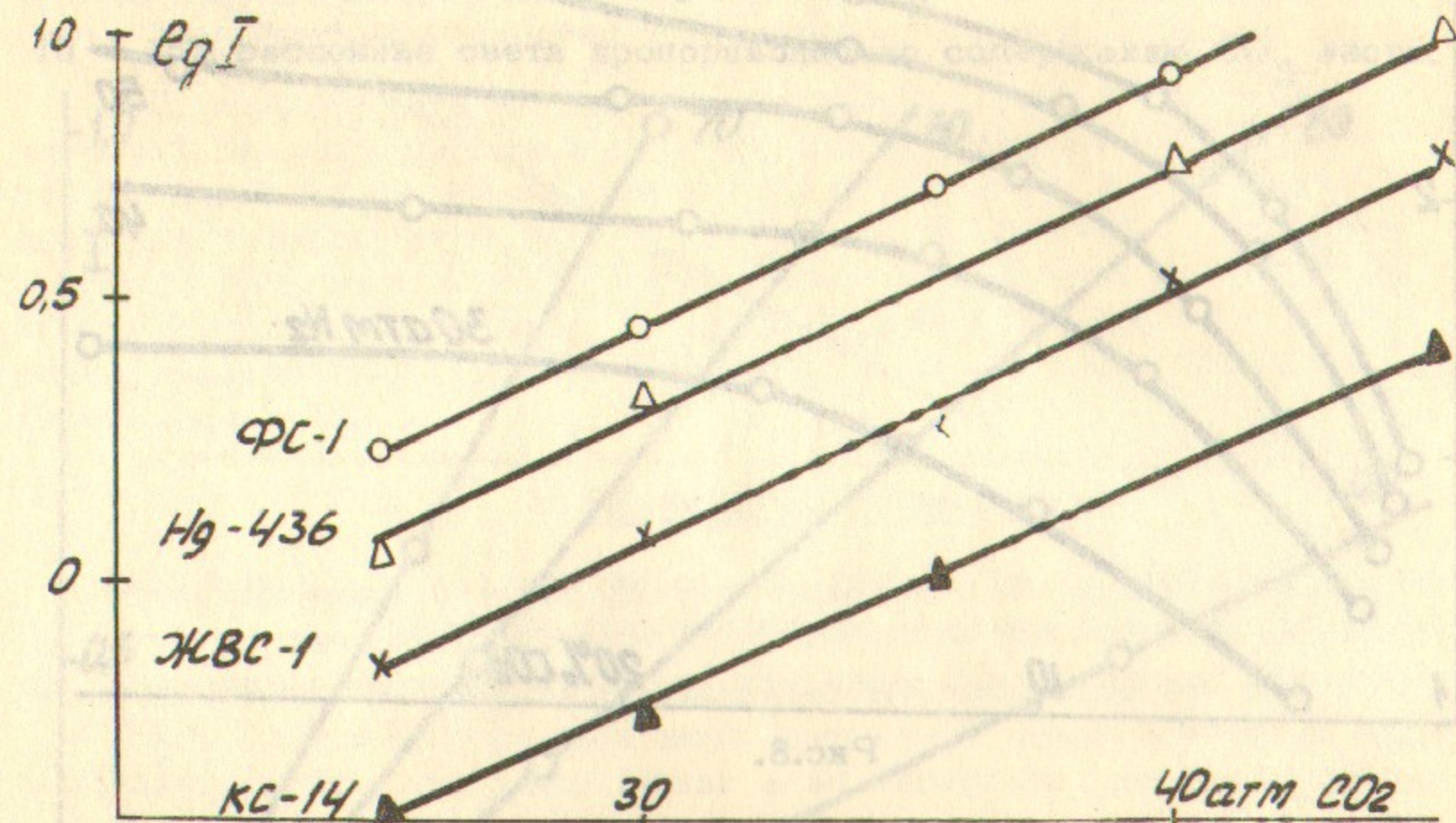


Рис. 10.

На рис. 10 эта зависимость приведена в случае рассеяния света на конденсате азота, образовавшегося в струе азота.

Нами также фиксировалась конденсация водорода. При начальном давлении водорода 110 атм амплитуда импульса света, рассеянного на каплях конденсата водорода, была в три раза меньше амплитуды света, рассеянного на каплях азота при давлении 60 атм.

#### 4. Обсуждение экспериментальных результатов

Как следует из рис. 6 зависимости рассеяния в струе  $\text{CO}_2$  от длины волны одинаковые для разных начальных давлений углекислого газа. Радиус капель конденсированного газа однозначно определяется зависимостью интенсивности рассеянного света от длины волны / 6 /. Поэтому одинаковый ход зависимости рассеяния света от длины волны для разных начальных давлений означает независимость величины радиуса капель от начального давления углекислого газа. Аналогичное явление отображает рис. 9: зависимость рассеяния света от длины волны одна и та же, как для  $\text{CO}_2$ , так и для смеси  $\text{CO}_2 + \text{H}_2$  и  $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ . Это означает, что радиус капель  $\text{CO}_2$  не зависит и от наличия в струе другого газа с более низкой температурой конденсата. Независимость радиуса капель от начального давления газа означает, что радиус капель определяется процессом их роста в условиях, когда средняя длина пробега в газе была существенно меньше радиуса капли. В этом случае вступают в действие обычные макроскопические законы теплообмена и скорость роста капель перестает зависеть от давления газа / 4 /. Это обстоятельство даёт возможность оценить размеры капель азота по формуле Осватича / 4 /. Если взять для температуры переохлаждения азота значение  $15^\circ \text{K}$  / 4 /, за время роста капли значение  $10^{-4}$  сек.,  $\lambda = 21$  кал/смсек град.,  $g \approx 48$  кал/2,  $\rho \approx 0,82$  см<sup>-3</sup> / 5 / и подставить эти значения в формулу Осватича / 4 /, то для радиуса капель азота получим величину  $\sim 5 \cdot 10^{-5}$  см. Эта величина близка к значению радиуса капли, которая находится из кривой, изображенной на рис. 10. Действительно, по теории Ми / 6 / первый максимум интенсивности в случае  $1 > m > 1,33$  наступает при  $\lambda \sim \pi R (m-1)$ ,  $\lambda$  - длина волны света, при которой рассеяние максимально. В нашем случае  $R \sim 4 \cdot 10^{-5}$  см,



$\lambda \sim 4 \cdot 10^{-5}$  см, следовательно  $R_{N_2} \sim 7 \cdot 10^{-5}$  см (Аналогичный расчёт даёт для капель конденсата  $CO_2$  величину  $5 \cdot 10^{-5}$  см).

Так как размер капель на выходе из сопла во всех случаях одинаков, рассеяние света можно считать пропорциональным числу капель, числу центров конденсации. Поэтому экспоненциальная зависимость рассеяния света от давления чистых газов ( $N_2$  и  $CO_2$ ) означает, что число центров конденсации экспоненциально возрастает с давлением газа (показатели экспоненты для  $CO_2$  и  $N_2$  и предэкспоненциальные множители имеют соответственно следующие значения на выходе из сопла:

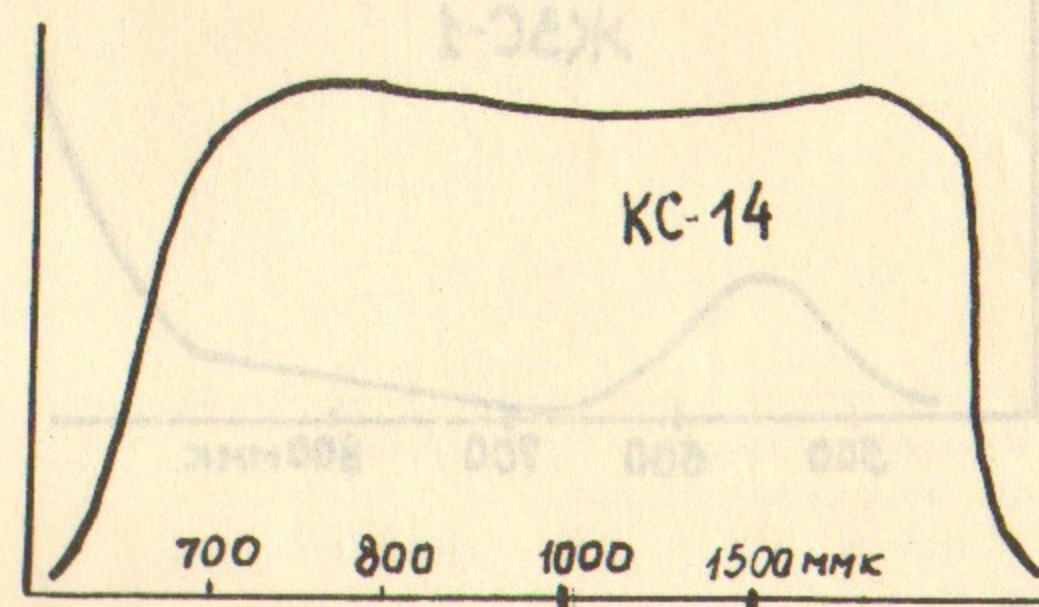
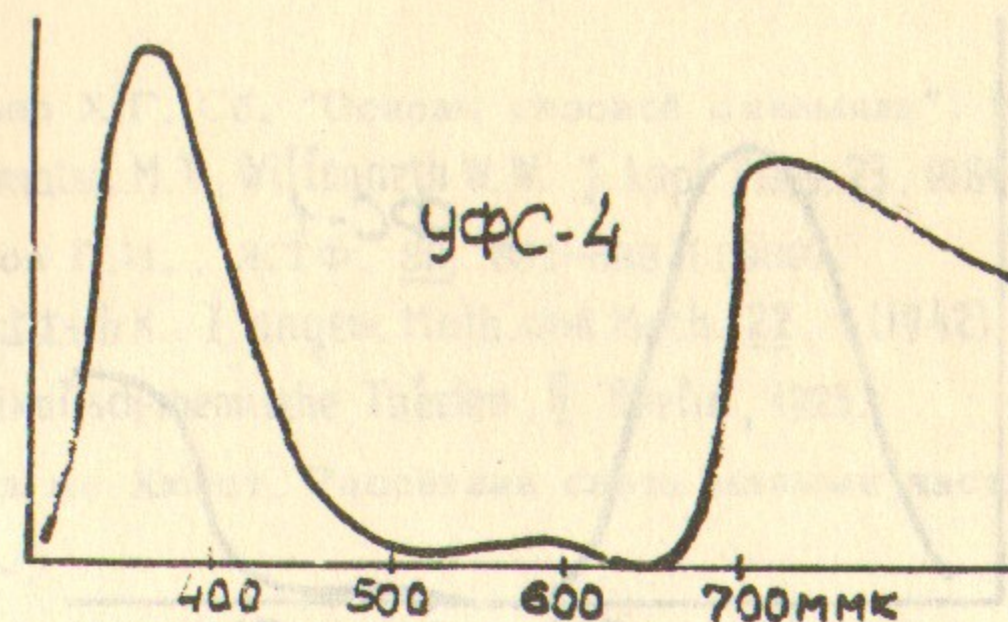
$$d_{N_2}^{-1} = P_{N_2}^0 \approx 18 \text{ атм}, \quad d_{CO_2}^{-1} = P_{CO_2}^0 \approx 9 \text{ атм},$$

$$N_{N_2}^0 \approx 8 \cdot 10^4 \text{ 1/см}^3, \quad N_{CO_2}^0 \approx 5 \cdot 10^4 \text{ 1/см}^3.$$

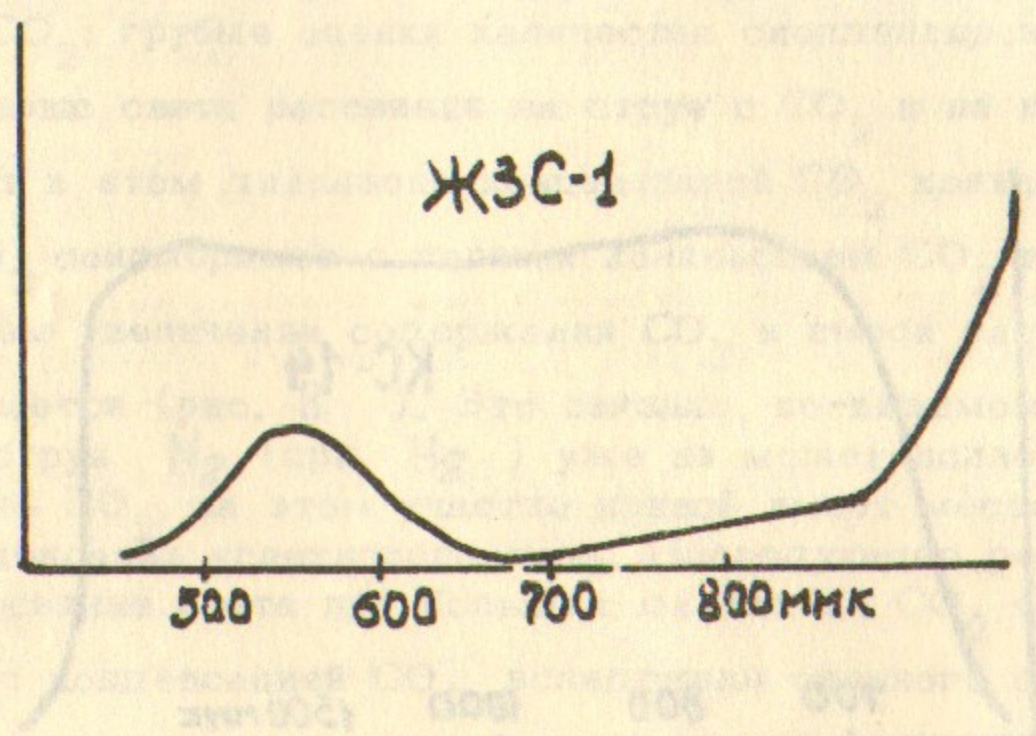
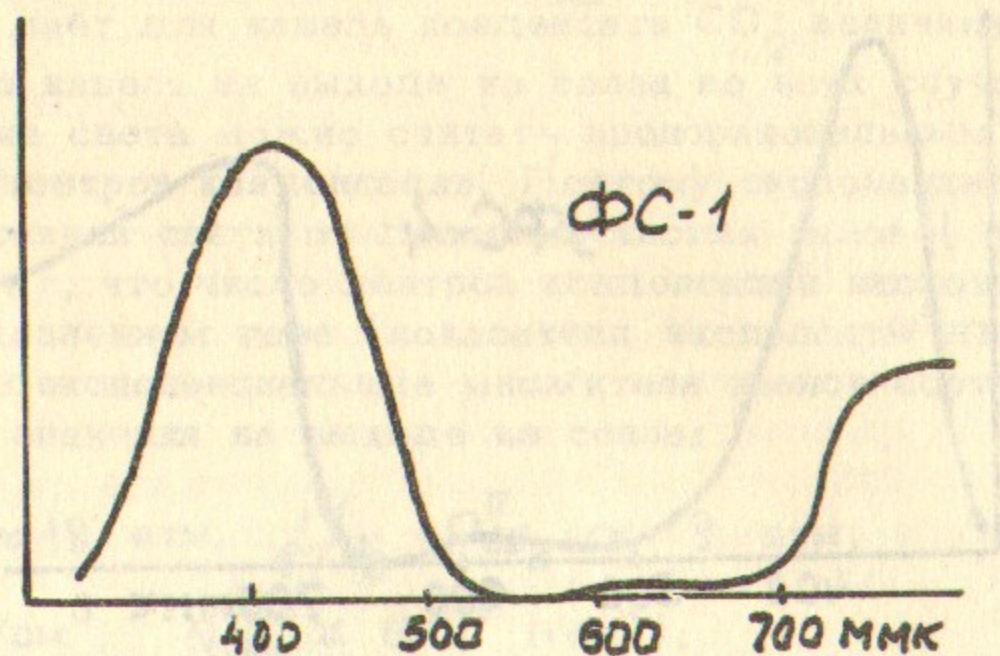
Такая зависимость числа центров конденсации от давления газа говорит о возможно флюктуационном происхождении центров конденсации. В отличие от чистых газов в смеси  $CO_2 + N_2$ .

$CO_2 + N_2$  рассеяние света вплоть до концентраций  $CO_2 \sim 10\%$  пропорциональна процентному содержанию  $CO_2$  в этих газах (рис. 7). По-видимому, этот эффект связан с почти полной конденсацией  $CO_2$ ; грубые оценки количества сконденсированного  $CO_2$  по отношению света рассеяния на струе с  $CO_2$  и на никелевой проволоке дают в этом диапазоне концентраций  $CO_2$  количество конденсата  $CO_2$  соизмеримое с полным количеством  $CO_2$  в струе.

При дальнейшем увеличении содержания  $CO_2$  в смеси рассеяния слабо увеличивается (рис. 8). Это связано, по-видимому, с тем, что холодная струя  $N_2$  (при  $H_2$ ) уже не может полностью сконденсировать  $CO_2$ , на этом участке кривой имеет место лишь частичная конденсация углекислого газа. Последующее резко возрастающее рассеяние света при больших давлениях  $CO_2$  связано, по-видимому, с конденсацией  $CO_2$  вследствие сильного охлаждения непосредственно углекислого газа в струе.



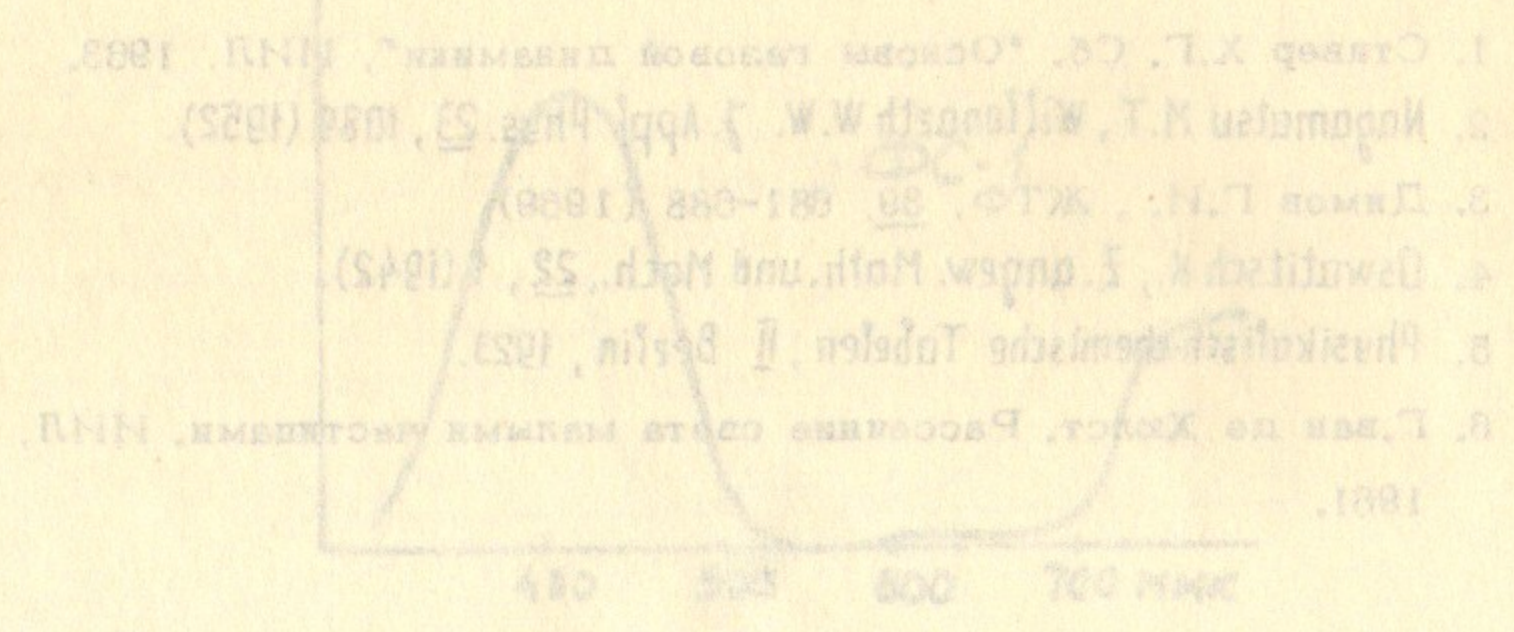




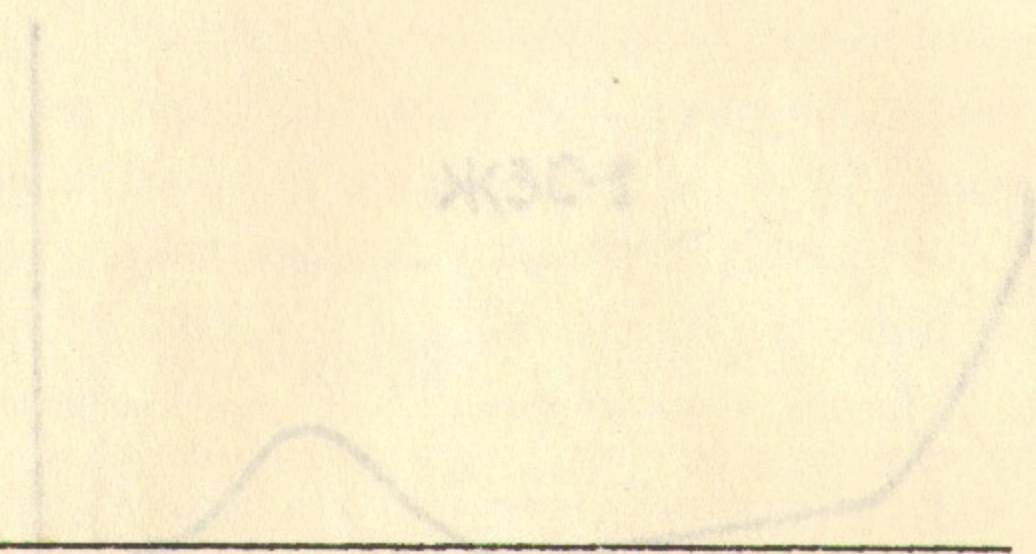
### Л и т е р а т у р а

1. Стивенс Х.Г. Сб. "Основы газовой динамики", ИИЛ, 1963.
2. Nagamatsu M.T., Wilfong W.W. *J. Appl. Phys.* 23, 1089 (1952).
3. Димов Г.И., *ЖТФ*, 39, 681-688 (1969).
4. Oswatitsch K., *Z. angew. Math. und Mech.*, 22, 1 (1942).
5. *Physikalisch-chemische Tabellen*, II Berlin, 1923.
6. Г. ван де Хюлст. *Рассеяние света малыми частицами*, ИИЛ, 1961.





1. Остров К.Т. Сб. "Основы теории дифракции", МНН, 1983.  
 2. Нормантен М.Т., Виллашалье В.У. Appl. Phys. 23, 1089 (1982).  
 3. Диниш П.М.: ЖТФ, 39, 681-688 (1988).  
 4. Гаврилич К., Z. angew. Math. und Mech., 25, 4 (1945).  
 5. Физическая оптика. Таблицы, II, Берлин, 1923.  
 6. Т. ван де Хорст, Рассеяние света малыми объектами, МНН, 1981.



Ответственный за выпуск О.Я.Савченко  
 Подписано к печати 10.11.69  
 Усл. 0,7 печ.л., тираж 200 экз. Бесплатно.  
 Заказ № 336

Отпечатано на ротапринте в ИЯФ СО АН СССР, нв.