

С393е

Г-687

12/5-70

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

8 - 4961



А.М. Горелов, А.Г. Зельдович, В.П. Ершов,
Л.С. Котова, И.Н. Куварзин, Ю.К. Пилипенко

ФИЛЬТРАЦИЯ ТВЕРДЫХ ПРИМЕСЕЙ АЗОТА
И КИСЛОРОДА В ЖИДКОМ ВОДОРОДЕ

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

1970

8 - 4961

А.М. Горелов, А.Г. Зельдович, В.П. Ершов,
Л.С. Котова, И.Н. Куварзин, Ю.К. Пилипенко

ФИЛЬТРАЦИЯ ТВЕРДЫХ ПРИМЕСЕЙ АЗОТА
И КИСЛОРОДА В ЖИДКОМ ВОДОРОДЕ

8322/2
48

Объединенный институт
ядерных исследований
Библиотека

I. Введение

Опыт эксплуатации дроссельных водородных ожижителей с адсорбционной очисткой газа низкого давления /1/ показывает, что для очистки сливных трубопроводов от твердых примесей, особенно на линиях с орто-, паракатализатором требуется периодически производить отогрев ожижителя. Обследование ожижительной установки /2/ показало, что при содержании примесей (N_2 и O_2) в газообразном водороде в количестве $2,3 \cdot 10^{-6}$ объемных долей концентрация примесей в получаемом жидком водороде составляет $1,5 \cdot 10^{-6}$ объемных долей. Поэтому для надежной работы сливного тракта ожижителя, а также получения жидкости с содержанием примесей не выше 10^{-6} объемных долей необходимо принимать дополнительные меры.

В ряде случаев, например, при работе с жидководородными пузырьковыми камерами, где опасно загрязнение оптических поверхностей, требуется водород с еще более низким содержанием примесей ($\approx 5 \cdot 10^{-7}$ объемных долей). Такой жидкий водород можно получать двумя путями:

- 1) путем низкотемпературной адсорбционной очистки газа на линии высокого давления перед ожижителем или
- 2) фильтрацией получаемой жидкости.

При наличии эффективных фильтров второй путь проще. Перед нами стояла задача - отыскать достаточно эффективные материалы для фильтрации жидкого водорода и получить исходные данные для расчета фильтров. Исследовались фильтры:

- а) из фторопласта (далее ФФП) с пористостью от 0,1 до 20 мк;

б) пылевой Петрянова ФПП-25-3 ТУМХП №Д2 ГУ-171-58. Материал - перхлорвинил; толщина слоя - 100+500 мк; δ волокна - 2,5 мк; вес - 60+100 г/ м²;

в) прессованный из асбестового волокна - ЕК- S2 фирмы Лейц.

II. Фильтрация примесей кислорода в жидком водороде

В первой серии опытов производилась фильтрация жидкого водорода от твердого кислорода. Для определения содержания кислорода имеются непрерывно действующие анализаторы. Необходимо было создать установку, в которой можно получать жидкость с повышенным содержанием примесей кислорода. Ясно, что отфильтровать мелкие частицы примесей труднее, чем крупные. Поэтому желательно, чтобы в искусственно загрязненной кислородом жидкости содержались мелкие равномерно распределенные частички твердых примесей. Для этой цели в поток водорода, очищенного в блоке очистки (4) и реакторе (5), до ожижения добавлялось известное количество кислорода из электролизера (6). Смесь сжималась компрессором (2) и поступала в криостат-ожижитель (1), где охлаждалась, а затем полностью сжималась за счет испарения жидкого водорода, кипящего в ванне (8). Полученная жидкость проходила через фильтрующий элемент (9), испарялась и, пройдя блок очистки (4), поступала во всасывающий коллектор компрессора. Концентрация кислорода в водороде зависела от величины тока в электролизере и определялась выражением:

$$C = \frac{K I}{V},$$

где C - концентрация O₂ в водороде перед ожижением в объемных долях; I - ток в электролизере в а; V - расход водорода в л/час (производительность компрессора); K = 0,21 - количество кислорода в л/час, выделяемое при токе в 1 а. Процесс фильтрации производился следующим образом: через фильтрующий элемент (9) непрерывно продавливался жидкий водород. Уровень жидкости в дюаре криостата поддерживался постоянным с тем, чтобы фильтрующий элемент все время находился в жидкости. Скорость фильтрации контролировалась ротаметром (7).

Таблица 1

Результаты опытов по фильтрации примесей кислорода в жидком водороде фильтром ФПП б 29/19. Пористость фильтра 2-3 мк; скорость фильтрации 0,8 $\frac{\text{л.ж. H}_2}{\text{час.см}^2}$

№№ п/п	Концентрация кислорода в водороде перед ожижением, объемные доли x 10 ⁶			Концентрация кислорода в жидкости, объемные доли x 10 ⁷			
	вычислено по току электролизера	замерено	средние значения	до фильтра		после фильтра	
				средн. значен.	средн. значен.		
1.	5,0	5,2	4,2	3,5	1,8	5,7	1,9
		11,5		2,3		1,7	
		3,2		1,8		2,2	
		1,8		1,5		1,2	
		1,4		1,0		1,3	
		1,8		1,7		1,5	
2.	9,0	-	-	4,3	2,8	-	-
		-		3,0		-	
		-		1,8		-	
		-		2,1		-	
3.	13,0	13,6	13,6	2,0	1,6	0,5	0,3
				1,1		0,4	
				0,2		0,1	
4.	Дозировка кислорода отсутствует, изучается фоновое содержание кислорода в системе.			1,4	1,5	0,9	0,7
				1,0		1,0	
				1,2		0,6	
				2,4		0,4	
						0,5	

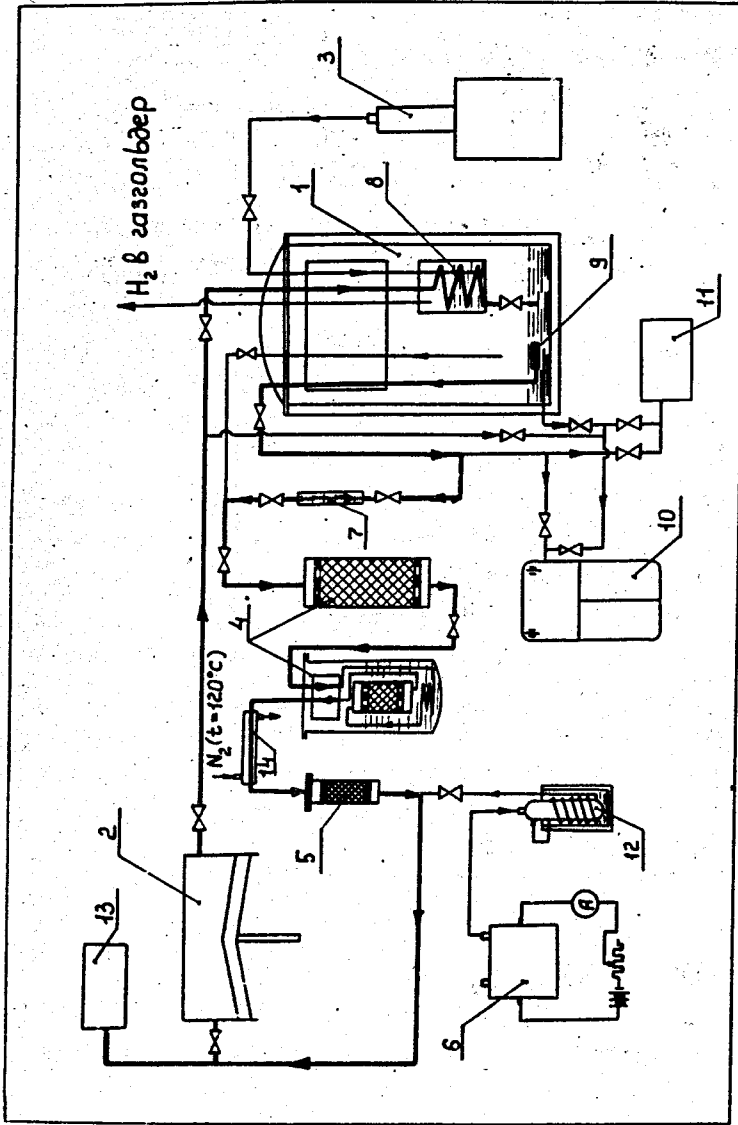


Рис.1. Схема установки для фильтрации твердых примесей кислорода в жидком водороде: 1 - криостат-ожижитель; 2 - мембранный компрессор; 3 - дюар с жидким водородом; 4 - блок очистки водорода; 5 - реактор с хромоникелевым катализатором; 6 - электролизер; 7 - ротаметр; 8 - ванна с жидким водородом; 9 - фильтр ФП; 10, 11 - газоанализаторы кислорода типа ГЛ-5108; 11 - газоанализатор кислорода АКШ; 12 - ловушка, охлаждаемая жидким азотом; 13 - буферная емкость на всасывающем коллекторе компрессора; 14 - подогреватель водорода.

Для сжатия водорода использовался компрессор мембранного типа. С целью устранения загрязнения системы газами, адсорбированными на стенках, дюар криостата, трубы, вентили и другие элементы были выполнены из нержавеющей стали. Установка позволяла анализировать газ до криостата-ожижителя, а также отбирать пробы жидкости до и после фильтра. Анализ водорода производился газоанализаторами типа ГЛ-5108 (10) и АКШ (11)^{13/}. Результаты опытов приведены в таблице 1. Одновременно проводилось изучение кислородного "фона" в водороде. Эти опыты проводились без добавления кислорода в водород. Для снижения кислородного "фона" на линии возвращаемого водорода из криостата-ожижителя был установлен реактор с хромоникелевым катализатором (5). Анализы показали (см. таблицу 1), что кислородный "фон" относительно велик: $1+2,5 \cdot 10^{-7}$ объемных долей. Результаты эксперимента позволяют сделать следующие выводы:

1. Большая часть примесей кислорода вымораживается в трубках теплообменника при ожигении водорода. Содержание кислорода в жидкости до фильтра невелико ($1,5+2,8 \cdot 10^{-7}$ объемных долей) и не зависит от содержания примесей в газе.

2. В исходных газе и жидкости имеется кислородный "фон" ($1+2,5 \cdot 10^{-7}$ объемных долей).

3. Содержание кислорода после фильтра уменьшается незначительно и нестабильно. Таким образом, с помощью фильтров ФП пористостью 2-3 мк существенно уменьшить содержание кислорода не удастся. Для контроля результатов этой серии опытов были проведены работы по фильтрации твердых примесей азота в жидком водороде.

III . Фильтрация твердых примесей азота в жидком водороде

§1. Использовалась та же установка, что и для фильтрации кислорода с той лишь разницей, что в поток водорода вместо кислорода добавлялась

азотно-водородная смесь (рис.2). Дозирование азота осуществлялось из баллона (6), заполненного азотно-водородной смесью с содержанием азота $3,4 \cdot 10^{-4}$ объемных долей. Анализы водорода производились газоанализатором МКЗ (10) периодического действия /4/. Использовались фильтры с поверхностью фильтрации $15,9 \text{ см}^2$, пористостью 2+3, 5+7, 20 мк. Получены следующие результаты (см. таблицу 2):

1. Средняя концентрация примесей азота в жидком водороде, полученного ожижением газообразного водорода с содержанием азота $0,8 + 6 \cdot 10^{-5}$ объемных долей, составляла $2,2 \cdot 10^{-6}$ объемных долей. Как и ранее, значительная часть примесей вымораживалась в трубках теплообменников.

2. Изменение пористости фильтров в пределах 2-20 мк практически не влияет на чистоту фильтрата. Возможно, что несколько худшие результаты, полученные с помощью фильтра пористостью 5-7 мк, были вызваны ослаблением крепления фильтра.

3. Целесообразно попытаться получить жидкий водород с большим содержанием примесей азота, чем $2 \cdot 10^{-6}$ объемных долей, дозируя азотно-водородную смесь непосредственно в жидкий водород вблизи фильтра.

§2. Для проведения опытов с непосредственным дозированием азотно-водородной смеси ($3,4 \cdot 10^{-4}$ объемных долей N_2) в жидкий водород была использована та же установка, что и в предыдущем случае. Был лишь изменен способ дозирования смеси. Трубка, по которой подавалась смесь, вводилась в криостат-ожижитель ниже уровня жидкого водорода, у фильтра. Скорость дозирования смеси составляла 250 л/час. Жидкий водород при этом в случае отсутствия осадка должен был бы иметь концентрацию азота $7 \cdot 10^{-6}$ объемных долей. Полученные результаты аналогичны предыдущим. Новый способ дозирования не увеличивал содержание примесей в жидком водороде до фильтра. Можно было сделать предположение, что твердые частицы азота оседают быстро на дно дьюара. Для подтверждения этого потребовалось создать установку, позволяющую визуальное наблюдения азота в жидком водороде.

Таблица 2

Результаты опытов по фильтрации примесей азота в жидком водороде фильтром ФФП 6 29/19. Жидкость получалась ожижением газообразного водорода с содержанием $0,8 + 6 \cdot 10^{-5}$ объемных долей N_2 . Скорость фильтрации $0,8 \frac{\text{л.ж. N}_2}{\text{час} \cdot \text{см}^2}$

№ п/п	Пористость фильтра, мк	Концентрация азота в водороде перед ожижением, объемные доли $\times 10^{-5}$	Концентрация азота, объемные доли				
			до фильтра $\times 10^6$	после фильтра $\times 10^7$			
			средние значения	средние значения			
1	2	3	4	5	6	7	
1.	2-3	1,8	2,2	2,4	2,0	2,6	
			2,2		2,7		
			2,2		2,6		
			2,3		7,2		
			1,2		2,1		
			2,1		2,4		
			1,3		2,0		
			1,6		2,5		
			2,5		2,8		
			2,4		2,2		
			3,4		2,1		
			1,2		3,1		
			8,6		2,2		
			2,1		1,8		
			1,9				
2.	5-7	2,2	5,1	2,8	13,0	4,5	
			4,6		3,2		
			4,0		3,5		
					4,2		
					14,0		
					2,7		
					3,4		
			1,5		6,7		
			0,9		2,5		
			1,8		2,5		
			1,0		4,4		
			0,8		8,0		
					1,1		
					3,5		
					2,0		
	2,3						
	5,0						

1	2	3	4	5	6	7
			1,7	1,7	4,0	
			1,4		4,1	
		1,4	1,6		5,0	
			3,1		3,8	
			1,5			
			2,4		3,3	
			3,5		4,0	
		0,8	1,4		3,3	
			8,3		2,7	
			2,9		5,0	
			2,2			
			1,2			
			0,8			
3.	20	2,0	1,5		3,4	
			1,1		3,5	
			1,0		3,2	
			0,9	1,0	2,5	2,6
			0,9		2,2	
			0,9		3,8	
			0,9		5,6	
			0,9		1,0	
					1,7	
					1,6	
					2,5	
					2,0	

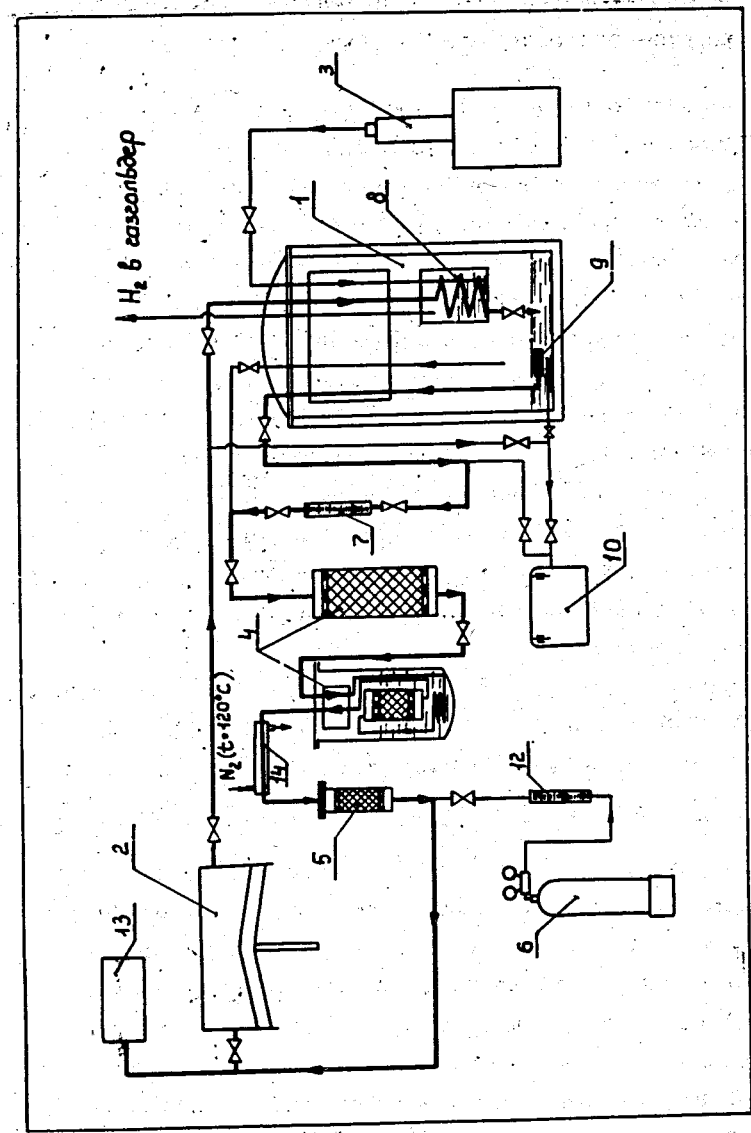


Рис.2. Схема установки для фильтрации твердых примесей азота в жидком водороде. Обозначения те же, что на рис. 1, за исключением: 6 - баллон с азотно-водородной смесью; 10 - газоанализатор МКЗ, определяющий сумму примесей; 12 - ротаметр.

IV. Фильтрация примесей твердого азота с дозированием азотно-водородной смеси в жидкий водород

Жидкий водород из дюара (2) через сифон (7) заливался в сосуд с лавсановыми окнами (1) и далее через фильтрующий элемент (6) сливался из сосуда, испарялся и через блок очистки (4) возвращался в систему ожижительной установки (рис. 3). Расход водорода, сливаемого из сосуда, контролировался после испарения ротаметром (5). Уровень жидкого водорода в сосуде поддерживался постоянным. Для получения жидкого водорода с повышенным содержанием примесей твердого азота в сосуд из баллона (3) дозировалась азотно-водородная смесь с содержанием азота $3,4 \cdot 10^{-4}$ объемных долей. Для предотвращения закупорки дозирочной трубки (8) азотом последняя прогревалась потоком газообразного водорода, пропускаемого по трубке (9). Сопротивление фильтра в процессе работы измерялось дифманометром (11), заполненным тетрабромэтаном. Для предотвращения попадания паров тетрабромэтана в водород на импульсных линиях дифманометра были установлены ловушки (12), охлаждаемые жидким азотом.

Опыты проводились на фильтрах ФФП 6 29/19 (пористостью 0,1; 1 и 2-3 мк), ФПП-25-3 толщиной в 9 и 15 слоев, ЕК- S2 , толщиной $\delta = 3$ мм и $\delta = 6$ мм . Удельный расход жидкого водорода через фильтр изменялся в пределах $0,6 + 3,4 \frac{\text{лж. N}_2}{\text{час. см}^2}$. Количество дозируемой азотно-водородной смеси было таким, что в случае отсутствия выпадания осадка концентрация жидкости до фильтра составила бы $0,7 + 3 \cdot 10^{-5}$ объемных долей. В целях экономии жидкого водорода фильтрация жидкости велась только во время отбора жидкости на анализ. В промежутках между анализами жидкость через фильтр не пропускалась, но уровень жидкого водорода поддерживался рабочим, так что фильтр постоянно был погружен в жидкость. Фильтрация и одновременно подача азотно-водородной смеси начинались за 15 мин. до начала анализа. В процессе опытов регистрировалось суммарное количество жидкости, пропущенное через фильтр к моментам начала и конца отбора проб на анализ. Результаты анализов представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты опытов по фильтрации примесей азота в жидком водороде (примеси азота получались дозированием в жидкий водород азотно-водородной смеси с содержанием $N_2 \cdot 3,4 \cdot 10^{-4}$ объемных долей).

№№ п/п	Тип и размеры фильтра	Порист. фильтра, мк	Скорость фильтрации, лж. N ₂ / час. см ²	Концентрация азота в жидкости, объемные доли				
				до фильтра x 10 ⁶		после фильтра x 10 ⁷		
				ср. значен.		ср. значен.		
1	2	3	4	5	6	7	8	
1.	ФФП/29/19	1	0,6	3,6	3,6	4,6		
						4,7		
						4,1		
						6,0		
						5,5		
						6,6		
						6,4		
						3,8		
						4,5		
						5,0		
						4,9		
						7,4	3,6	
						3,3		5,2
						4,1		
						3,0		
5,7								
5,8								
4,0								
9,6								
5,4								
4,8								
4,9								
4,9								
4,9								

1	2	3	4	5	6	7	8
						6,0 6,2 5,4 6,7 8,7 7,6 7,2 7,0 6,1 5,8 6,1 8,0 5,4 5,0 5,1 5,2 5,6 5,1 5,3 7,4 6,8	
8.	ФФП/29/19	2-3	3,4	5,3 1,7 1,4	2,8		6,5
						2,1 2,8 2,1 2,4 2,2 2,8 3,9 4,2 3,6 3,9 4,0 4,4	
9.	ФПП-25-3		0,6				3,2
						4,2 6,3 5,7 4,8 5,0 5,3 4,5 3,8	
10.	ФПП-25-3		1,0				5,0
						5,8 5,2 5,6 5,7 5,3 6,0	
11.	ФПП-25-3		2,0				5,6
						4,5 7,6 5,9 6,9 7,4 4,3 4,9 5,0	
12.	ФПП-25-3		3,4				5,8

1	2	3	4	5	6	7	8
						3,3 4,1 4,0 3,9 4,1	3,9
13.	ФПП-25-3		0,6				
						5,7 5,3 5,0 5,5 5,3	5,4
14.	ФПП-25-3		1,0				
						4,7 4,7 4,4 6,0 5,0	5,0
15.	ФПП-25-3		2,0				
						5,7 6,0 6,3 5,8 6,0	6,0
16.	ФПП-25-3		3,4				
						2,1 2,0 2,0 1,9 2,0	2,0
17.	ФФП/29/19	0,1	0,6	0,8	0,8		
						2,3 2,7 3,8 2,3	2,8
18.	ФФП/2 9/19	0,1	1,0				
						2,5 2,2 2,7 5,5	3,2
19.	ФФП/29/19	0,1	2,0				
						2,8 4,7 3,0 2,6	3,3
20.	ФФП/29/19	0,1	3,4	1,3	1,3		
						3,6 3,3 2,0 1,9 1,9	2,5
21.	ЕК-S ₂		0,6				
	$\delta = 3 \text{ мм}$					4,3 4,6 3,6 3,8 3,9	4,0
22.	ЕК-S ₂		1,0				
	$\delta = 3 \text{ мм}$						

1	2	3	4	5	6	7	8
23.	ЕК-S 2 $\delta = 3$ мм		2,0			4,2 4,8 2,7 3,4 2,8	3,6
24.	ЕК-S 2 $\delta = 6$ мм		0,6			1,4 1,4 1,5 3,0 1,7 3,1 3,2 3,0	2,3
25.	ЕК-S 2 $\delta = 6$ мм		1,0	3,5	3,5	0,6 1,5 1,0 0,8 0,7 1,8 1,4 4,0 3,0 4,3 3,6 4,2	2,2
26.	ЕК-S 2 $\delta = 6$ мм		2,0			2,0 3,6 2,3 2,5 4,3	2,9

1. В процессе опытов было замечено, что примеси азота быстро выпадают на дно сосуда в виде рыхлого пылеобразного осадка. Осадок очень непрочен удерживается на стенках сосуда и легко взмучивается при перемешивании жидкости. В связи с этим необходимо было поставить специальные опыты по определению содержания примесей после отстаивания осадка.

2. Средняя концентрация примесей азота в жидком водороде до фильтра так же, как и в случае ожижения газообразного водорода с содержанием азота $0,8+6 \cdot 10^{-5}$ объемных долей (раздел III), составляла $2,2 \cdot 10^{-6}$ объемных долей. Примерно такое же количество примесей было обнаружено в жидком водороде, сливаемом из ожижителя /1/.

3. Средние значения наблюдаемых концентраций азота в жидком водороде после фильтров в зависимости от удельного расхода приведены на рис. 4. Средняя концентрация азота с увеличением удельного расхода возрастает. Лучшие результаты получены на фильтре ФФП пористостью 0,1 мк и фильтрах ЕК-S 2 с толщиной слоя $\delta = 3$ мм и $\delta = 6$ мм. Концентрации азота для 2-3-микронного фильтра ФФП и фильтров ФПП-25-3 практически одинаковы. Несколько худшие результаты получены на одномикронных фильтрах ФФП. Возможно, что это объясняется каким-либо дефектом фильтров.

4. Средние значения сопротивлений фильтра ФФП δ 29/19 пористостью 2-3 мк и фильтра из 15 слоев ФПП-25-3 приведены на рис. 5 и 6. Сопротивления фильтров ФФП пористостью 0,1 мк, 1 мк и 9-слойного ФПП-25-3 подобны приведенным. Сопротивления фильтров ЕК-S 2, $\delta = 3$ мм и $\delta = 6$ мм вдвое больше сопротивлений фильтров ФФП и ФПП-25-3.

5. Сопротивление фильтров ФФП возрастает с увеличением количества пропускаемой жидкости.

6. Наблюдается также увеличение сопротивления в ходе первых 5-10 анализов, затем процесс нарастания сопротивления прекращается.

7. Сопротивление фильтра в начале следующего анализа, как правило, меньше, чем в конце предыдущего. По-видимому, нарастание сопротивления может быть объяснено выпадением осадка и "фильтрационным эффектом" /5/, сущность которого заключается в том, что при филь-

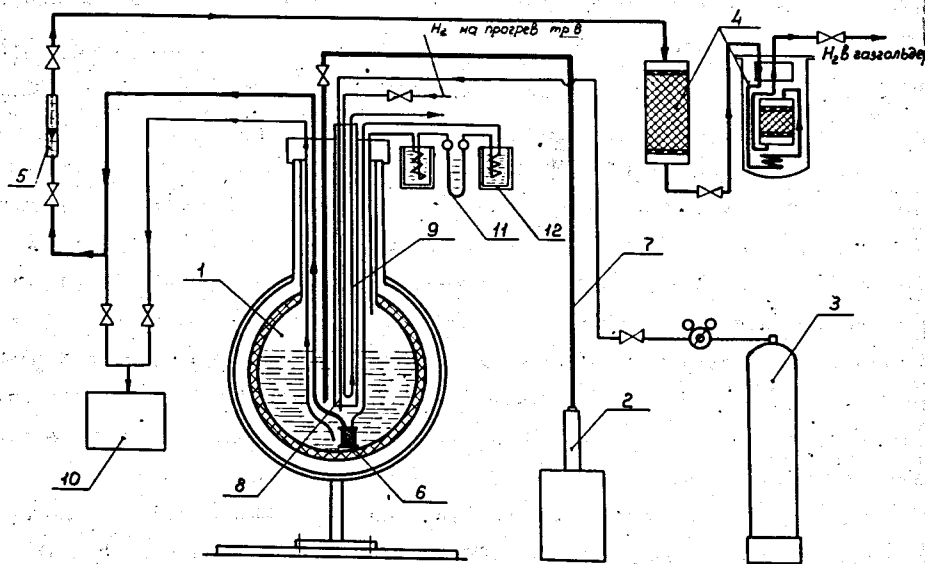


Рис.3. Схема установки для фильтрации жидкого водорода от примесей азота с дозированием азотно-водородной смеси в жидкий водород: 1 - сосуд с лавсановыми окнами; 2 - дюар жидкого водорода; 3 - баллон с азотно-водородной смесью; 4 - блок очистки водорода; 5 - ротаметр; 6 - фильтр; 7 - сифон для перелива водорода; 8 - трубка дозирования азотно-водородной смеси в жидкий водород; 9 - трубка для прогрева дозирочной трубки; 10 - газоанализатор на сумму примесей МКЗ; 11 - дифманометр; 12 - ловушка, охлаждаемая жидким азотом.

тровании чистых жидкостей сопротивление фильтра иногда резко возрастает из-за выделения из жидкости пузырьков растворенного в ней газа. В случае жидкого водорода в фильтре происходит процесс дросселирования его с образованием пузырьков газа, которые оседают в порах фильтра и вызывают увеличение его сопротивления. Основываясь на этом явлении, можно предположить, что нарастание сопротивления во время первых анализов происходит из-за увеличения количества пузырьков в порах фильтра пока не наступит насыщение. По-видимому, к началу следующего анализа часть пузырьков газа конденсируется, а новые не образуются, так как нет потока жидкости через фильтр. Этим объясняется снижение сопротивления в начале следующего отбора жидкости на анализ.

8. В случае использования фильтра ФПП-25-3 нарастания сопротивления в ходе одного анализа не было. В процессе опыта сопротивление фильтра иногда резко увеличивалось, а затем снова снижалось, что также можно объяснить "фильтрационным эффектом".

V . Отстаивание примесей азота в жидком водороде

Отстаивание осадка производилось на установке с дозированием азотно-водородной смеси в жидкий водород (см. раздел IV, рис. 3). Условия получения загрязненного азотом жидкого водорода были те же, что и в предыдущем опыте. Трубка, по которой подводилась азотно-водородная смесь, находилась ниже уровня жидкости на расстоянии 5,5 см от дна. Отбор проб на анализ производился с помощью трубки, расположенной в 2,5 см от дна. Через 15 минут после начала заливки жидкого водорода и дозирования азотно-водородной смеси процесс подачи смеси прекращался, производилось отстаивание в течение 5, 15 или 60 мин. и затем начинался отбор пробы на анализ, который длился 50 минут.

Результаты анализов показаны в таблице 4 и на рис. 7.

На основании проведенных опытов можно сделать следующие выводы:

1. Осаждение азота в жидком водороде происходит хорошо. Концентрация примесей азота при отстаивании в течение одного часа до нача-

Таблица 4

Результаты опытов по отстаиванию примесей азота в жидком водороде (примеси азота получались дозированием в жидкий водород азотно-водородной смеси с содержанием $N_2 \cdot 3,4 \cdot 10^{-4}$ объемных долей). Средняя концентрация азота в исходной жидкости $c_0 = 2,2 \cdot 10^{-6}$ объемных долей

№№ п/п	Время начала отбора анализа от момента начала отстаивания, (мин.)	Время конца отбора анализа от момента начала отстаивания, (мин.)	Концентрация азота в жидкости (объемные доли) $\times 10^7$	
			средние значения	
1	2	3	4	5
1.	5	60	7,1	7,0
		55	6,7	
		55	7,3	
2.	15	45	5,1	5,8
		45	6,0	
		70	6,8	
		65	5,7	
		65	5,1	
		70	5,6	
		75	7,2	
65	4,6			
3.	30	85	6,8	4,5
		85	4,1	
		85	4,4	
		76	4,2	
		83	4,7	
		85	3,4	
		85	4,7	
		82	4,2	
85	4,1			
4.	60	115	2,6	2,5
		115	3,0	
		115	1,8	
		110	1,7	
		110	2,2	
		110	2,5	
		115	2,2	
115	2,7			
110	3,4			

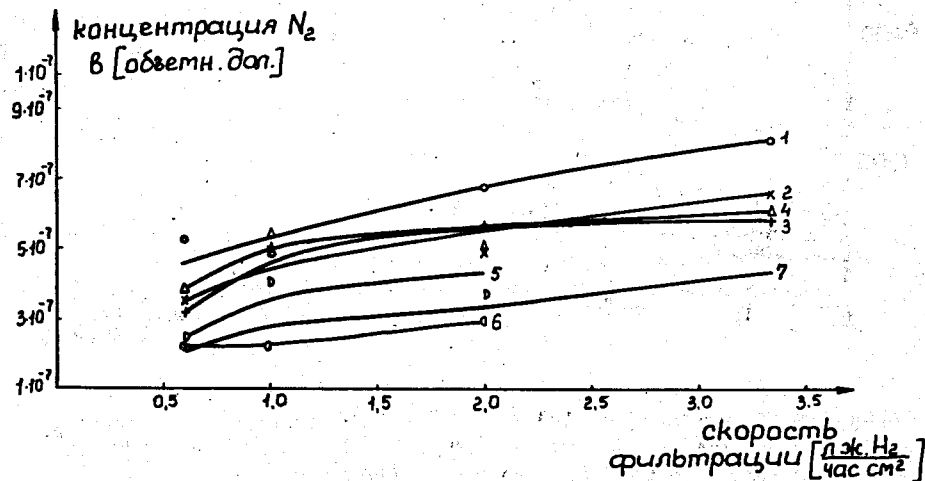


Рис.4. Средние значения наблюдаемые концентраций азота в жидком водороде после фильтров:

1. фильтр ФФП ϕ 29/19 пористостью 1 мк;
2. фильтр ФФП ϕ 29/19 пористостью 2-3 мк;
3. фильтр ФПП-25-3 толщиной в 9 слоев;
4. фильтр ФПП-25-3 толщиной в 15 слоев;
5. фильтр ФФП ϕ 29/19 пористостью 0,1 мк;
6. фильтр ЕК-S2 толщиной $\delta = 3$ мм;
7. фильтр ЕК-S2 толщиной $\delta = 6$ мм.

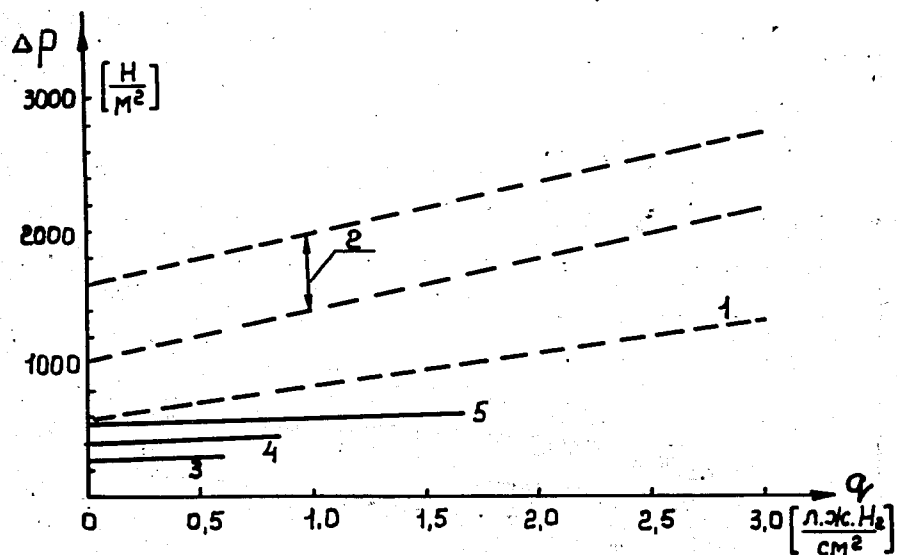


Рис.5. Сопротивление Δp фильтра ФП 6 29/19 пористостью 2-3 мк в зависимости от удельного количества жидкости q , пропущенной через фильтр в процессе каждого анализа:

- 1 - анализ I, скорость фильтрации $3,4 \frac{\text{л.ж. Н}_2}{\text{час.см}^2}$;
- 2 - зона сопротивлений при анализах II-VI, XXVII-XXIX, скорость фильтрации $3,4 \frac{\text{л.ж. Н}_2}{\text{час.см}^2}$;
- 3 - анализы VII-XIII, скорость фильтрации $0,6 \frac{\text{л.ж. Н}_2}{\text{час.см}^2}$;
- 4 - анализы XIV-XXI, скорость фильтрации $1,0 \frac{\text{л.ж. Н}_2}{\text{час.см}^2}$;
- 5 - анализы XXII-XXVI, скорость фильтрации $2,0 \frac{\text{л.ж. Н}_2}{\text{час.см}^2}$.

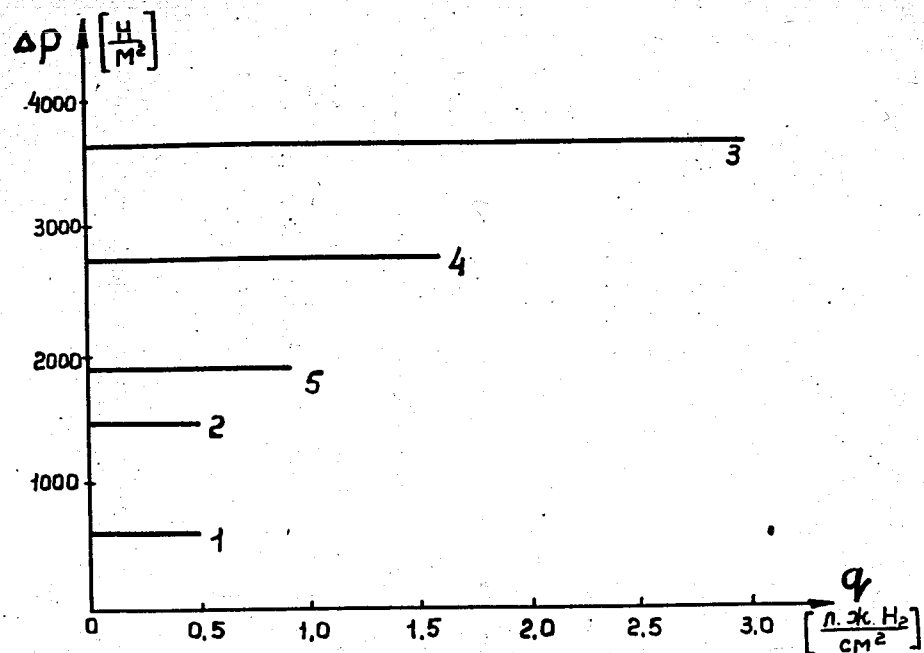


Рис.6. Сопротивление Δp фильтра ФПП-25-3 толщиной в 15 слоев в зависимости от удельного количества жидкости q , пропущенной через фильтр в процессе каждого анализа:

- 1 - анализы I-II, скорость фильтрации $0,6 \frac{\text{л.ж. Н}_2}{\text{час.см}^2}$;
- 2 - анализы III-V, скорость фильтрации $0,6 \frac{\text{л.ж. Н}_2}{\text{час.см}^2}$;
- 3 - анализы VI-X, скорость фильтрации $3,4 \frac{\text{л.ж. Н}_2}{\text{час.см}^2}$;
- 4 - анализы XI-XV, скорость фильтрации $2,0 \frac{\text{л.ж. Н}_2}{\text{час.см}^2}$;
- 5 - анализы XVI-XX, скорость фильтрации $1,0 \frac{\text{л.ж. Н}_2}{\text{час.см}^2}$.

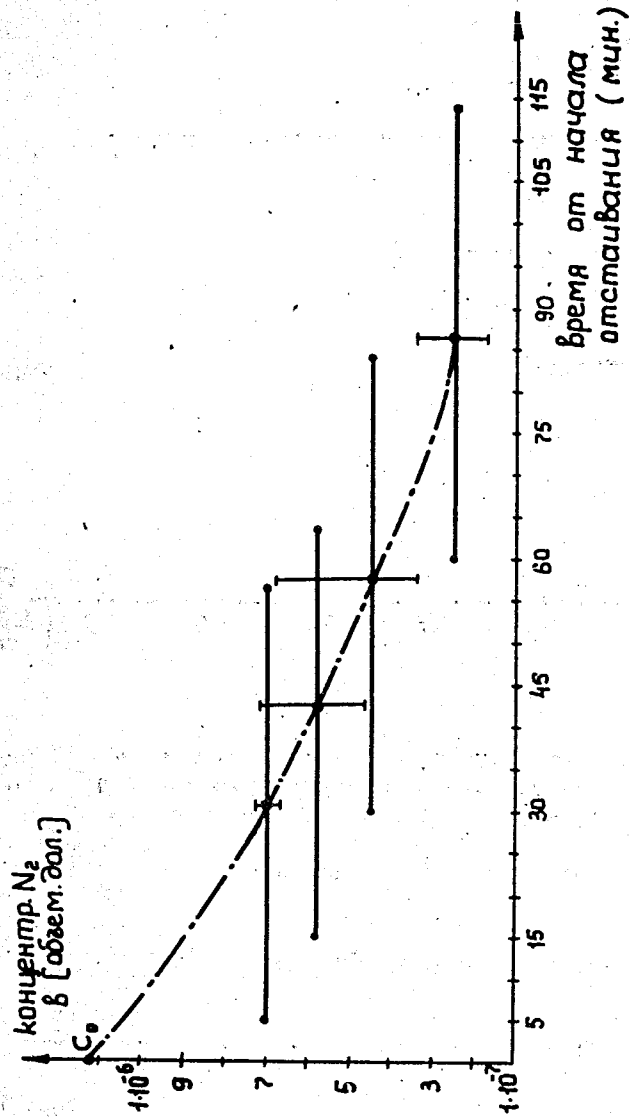


Рис.7. Содержание примесей азота в жидком водороде в зависимости от времени отстаивания. Горизонтальные прямые указывают время отбора пробы на анализ $c_0 = 2,2 \cdot 10^{-6}$ объемных долей (см. раздел IV.).

ла отбора анализа снизилась от $2,2 \cdot 10^{-6}$ до $2,5 \cdot 10^{-7}$ объемных долей.

2. Осаждение частиц между дозировочной трубкой и трубкой отбора на анализ (расстояние 3 см) длится не менее 1,5 часов. Отсюда скорость очистки жидкого водорода путем отстаивания составляет

$$2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{л.ж. } N_2}{\text{час} \cdot \text{см}^2 \text{ площади отстаивания}}$$

. Таким образом, скорость отстаивания во много раз меньше скорости фильтрации и сечение сосуда для отстаивания должно быть много больше площади фильтра при равных производительностях.

3. Фильтры необходимо конструировать таким образом, чтобы в них происходило два процесса одновременно: отстаивание и фильтрация. Это даст возможность увеличить длительность работы фильтра до регенерации.

Авторы пользуются случаем выразить глубокую благодарность Г.И. Гаю, Ким Сен Су, Л.Н. Манятовской, А.А. Перову за помощь в работе, а также Н.И. Баландикову и всему эксплуатационному персоналу криогенного отдела, обеспечившим бесперебойную работу установки.

Л и т е р а т у р а

1. Ю.К. Пилипенко. Препринт ОИЯИ 1092, Дубна, 1962.
2. Л.С. Котова, Ю.К. Пилипенко. Препринт ОИЯИ 2626, Дубна, 1966.
3. Ю.В. Шарвин, В.И. Андрианов, Е.А. Шарова. Заводская лаборатория №7, т. 21, стр. 853 (1955).
4. К.Н. Зиновьева. Заводская лаборатория №1, т.21, стр. 30 (1955).
5. В.А. Жужиков. Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий. Москва, Из-во "Химия", 1968.

Рукопись поступила в издательский отдел

17 марта 1970 года.