

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 6 — 1965

УДК 537.56 : 533.27

М. Я. ВАСИЛЬЕВА, А. А. ЗАЙЦЕВ, Н. А. МИСКИНОВА

ВЛИЯНИЕ ЛЕГКОИОНИЗУЕМОЙ ПРИМЕСИ НА ПОДВИЖНЫЕ СТРАТЫ В ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ И РАЗДЕЛЕНИЕ СМЕСЕЙ ГЕЛИЯ И НЕОНА С ВОДОРОДОМ

Исследуется влияние примеси H_2 на существование подвижных страт в Ne, He и Ag в области давлений $1 \div 21$ мм рт. ст. и разрядных токов $10 \div 1000$ ма. Приводятся данные о подвижных стратах в бинарных смесях инертных газов (He—Ag, He—Kr, He—Ne и Ne—Kr). Измерены время и скорость разделения смесей Ne— H_2 и He— H_2 .

Введение

В связи с тем что во многих случаях желательно иметь однородный положительный столб, встает задача устранения возникающих в нем неоднородностей. Одной из таких неоднородностей, как известно, являются подвижные страты.

Строгой теории, охватывающей все стороны явления страт, пока не существует. В литературе [1, 2] значительная роль в образовании страт отводится ступенчатой ионизации через метастабильный уровень.

Целью нашей работы являлось изучение влияния примеси водорода на существование подвижных страт в Ne, He и Ag и подвижных страт в бинарных смесях инертных газов (He—Ag, He—Kr, He—Ne и Ne—Kr).

Однако исследование таких смесей затрудняется разделением компонентов смеси, происходящим таким образом, что прианодные области разряда оказываются обедненными легкоионизируемой примесью. Поэтому в смесях Ne— H_2 и He— H_2 изучались также время и скорость установления стационарного состояния разделения, характеризующегося равновесием между направленным движением ионов легкоионизируемого компонента к катоду и противодействующей разделению диффузией из-за градиента концентрации этого компонента вдоль столба.

§ 1. Описание эксперимента

Исследования проводились со спектрально чистыми Ne, He, Kr и Ag в отпаянных трубках с оксидным катодом косвенного подогрева. Анод имел коническую форму. Внутренние диаметры трубок составляли от 8 до 28 мм, а их длина — 60 см. Водород получали с помощью водородных генераторов, представляющих собой никелевый цилиндр, запол-

ненный губчатым гидритом титана, насыщенным очищенным водородом. Генераторы градуировались в парциальных давлениях водорода по напряжению накала. Давление водорода, выделяемого генераторами, доходило до 1,5 мм рт. ст. В трубку генератор монтировался со стороны катода.

Наблюдение подвижных страт производилось либо с помощью вращающегося зеркала, либо с помощью фотоэлектронного умножителя, сигнал с которого подавался на осциллограф ИО-4. Исчезновение и появление страт определялось по исчезновению и возникновению колебаний на экране осциллографа. Трубка питалась от стабилизированного выпрямителя, дающего разрядный ток до 1,2 а. Измерения производились при давлениях основного газа 1÷21 мм рт. ст. Для некоторых наблюдений требовалось изменить ток скачком от малых значений (10÷50 ма) до максимальных; это достигалось путем резкого уменьшения сопротивления разрядной цепи.

§ 2. Результаты эксперимента

Влияние примеси водорода на подвижные страты в инертных газах

В чистом инертном газе при данном давлении подвижные страты существуют вплоть до некоторого значения разрядного тока, так называемого верхнего граничного тока. Затем они исчезают, и столб становится однородным. Величина этого граничного тока обычно уменьшается с ростом давления, но, например, в Ne даже при давлении 14 мм рт. ст. она достигает 500 ма.

Добавление водорода к Ne при неизменной силе тока приводит к тому, что страты начинают исчезать сначала у катода; затем с увеличением примеси H₂ область однородного столба расширяется в направлении к аноду и, наконец, при некоторой примеси водорода столб целиком становится однородным. Если же при неизменной примеси водорода изменять разрядный ток, то страты, возникнув у анода при некотором (назовем его нижним граничным) токе, при дальнейшем увеличении тока занимают все большую и большую часть разрядной трубки, так что граница между однородным столбом и стратами перемещается к катоду.

Все эти явления тесно связаны с разделением смеси Ne—H₂. Для гашения страт в Ne при данном давлении требуется, очевидно, какое-то определенное количество водорода. Но из-за того, что водород имеет более низкий потенциал ионизации, чем неон, происходит преимущественная ионизация водорода; к тому же добавление легкоионизируемого компонента снижает электронную температуру смеси, так что ионизация инертного газа затруднена по сравнению с чистым неоном. Поэтому в токе положительных ионов, движущихся к катоду, будут преобладать ионы водорода, и в соответствии с этим прикатодные области разряда должны были бы обогащаться водородом, а прианодные — обедняться. Теория этого явления разработана в [3]. В наших экспериментах обогащения прикатодной области водородом не происходит, так как водородный генератор при определенном напряжении накала поддерживает у катода вполне определенное парциальное давление водорода, а его избыток поглощается. Но прианодная область, конечно, обедняется водородом, и концентрация его может оказаться недостаточной для гаше-

ния страт у анода, тогда страты появятся там вновь. Если же примесь водорода настолько велика, что и при наличии разделения водорода достаточно для гашения страт у анода, то столб целиком однороден.

По данным работ [4, 5, 6], с ростом тока возрастает степень разделения смеси, так что в нашем случае область, обедненная водородом со стороны анода, увеличивается, и страты занимают все большую и большую часть трубки.

При резком изменении разрядного тока от малых значений ($10 \div 50$ *ма*), когда разделения почти нет, до $350 \div 500$ *ма* при некоторых примесях водорода столб сначала остается однородным, затем через некоторое время у анода появляются страты, и область слоистого столба в трубке постепенно увеличивается в направлении к катоду. При резком уменьшении тока наблюдается обратное явление: страты постепенно исчезают у катода, а затем и у анода, так что столб становится однородным.

В табл. I приведены данные о том, на каком расстоянии от анода находится граница между слоистым и однородным положительным столбом.

Таблица I

Граница слоистого столба. Диаметр трубки 8 мм, длина 60 см

Газ	p газа, мм рт. ст.	p_{H_2} , мм рт. ст.	H_2 , %	i , ма	l , см от анода
Ne	8	0,31	3,9	350	30
				450	40
				500	50
		0,325	4,1	350	15
				450	20
				500	25
0,375	4,7	350	5		
		450	8		
		500	10		
He	12	1,13	9,4	350	30
				450	33
				500	35
		1,25	10,5	350	20
				450	23
				500	25
1,30	10,8	350	15		
		450	18		
		500	20		

Как видно из этой таблицы, область слоистого столба действительно увеличивается с ростом тока и уменьшается с ростом примеси водорода. Аналогичные результаты получены в Ne при давлениях 12 и 16 мм рт. ст. и He при $p = 16$ мм рт. ст. В He при том же давлении, что и в Ne, но значительно больших примесях водорода (в 4—5 раз), область слоистого столба несколько больше.

Результаты измерения нижнего и верхнего граничных токов в смеси $\text{Ne}-\text{H}_2$ приведены на рис. 1. На нем область существования страт заключена внутри кривых. Верхний граничный ток, как видно, остается почти постоянным, причем приблизительно равным соответствующему току в чистом газе. При давлениях Ne 2 и 4 мм рт. ст. верхняя граница существования страт не была обнаружена, так как она лежит выше 1, 2 а.

С ростом примеси водорода увеличивается нижний граничный ток, и, наконец, при некоторой примеси нижний и верхний токи совпадают, столб становится однородным. Если продолжить эти кривые до пересечения с осью абсцисс, то точка пересечения кривой, снятой при неизменном давлении Ne , с этой осью соответствует, очевидно, той минимальной примеси водорода, которая бы уничтожила страты в трубке, если бы не было разделения. При увеличении давления Ne кривые, сохраняя форму, сдвигаются вправо, что соответствует росту этой минимальной примеси водорода по величине, но процент примеси к давлению основного газа падает с 5% при $p_{\text{Ne}}=2$ мм рт. ст. до 1,4% при $p_{\text{Ne}}=21$ мм рт. ст.

В смеси $\text{Ne}-\text{H}_2$ наблюдается аналогичная зависимость граничных токов от величины примеси водорода, но для гашения страт в Ne тре-

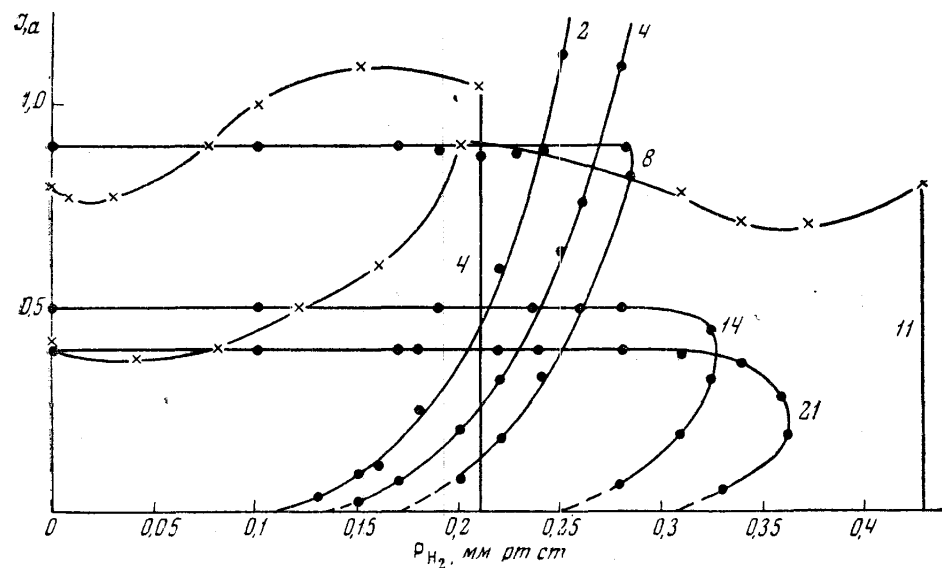


Рис. 1. Граничные токи в смеси $\text{Ne}-\text{H}_2$ и $\text{Ar}-\text{H}_2$ в функции от давления H_2 . Цифры у кривых дают давление основного газа. ● — $\text{Ne}-\text{H}_2$, x — $\text{Ar}-\text{H}_2$

буется значительно больший, чем в Ne , минимальный процент примеси водорода, примерно 7—8%. Причем этот процент также уменьшается с ростом давления Ne .

В смеси $\text{Ar}-\text{H}_2$ была найдена верхняя граница токов существования страт. На рис. 1 штрих-пунктиром показана зависимость верхнего граничного тока в смеси $\text{Ar}-\text{H}_2$ при давлениях Ar 4 и 11 мм рт. ст. Однако характер возникновения и исчезновения страт в такой смеси резко отличается от подобного явления в смеси $\text{Ne}-\text{H}_2$. Если в смеси $\text{Ne}-\text{H}_2$ ис-

чезновение и появление страт происходило постепенно по длине трубки и в течение какого-то определенного промежутка времени, то в смеси $\text{Ag}-\text{H}_2$ при резком увеличении тока (от 100 до 500 *ма*) страты возникали и устанавливались практически мгновенно сразу во всей трубке. При скачкообразном уменьшении тока наблюдался также быстрый обратный процесс исчезновения страт в трубке.

Такой быстрый процесс, а также однородное по длине трубки свечение разряда свидетельствует о том, что разделения в данной смеси не происходит, как это отмечено и в [6]. Следует заметить, что в данном случае разность потенциалов ионизации компонентов составляет всего 0,3 *в*. Здесь разделение могло бы происходить за счет разности молекулярного веса H_2 и атомного веса Ag в соответствии с импульсной моделью разделения [7], построенной по аналогии с теорией, объясняющей возникновение продольного градиента давления в разряде постоянного тока [3, 8, 9]. Отсутствие разделения смеси $\text{Ag}-\text{H}_2$ указывает на то, что если такой эффект и возможен, то он намного слабее разделения, обусловленного разностью потенциала ионизации компонентов.

Исследование процесса установления стационарного состояния разделения смесей $\text{Ne}-\text{H}_2$ и $\text{He}-\text{H}_2$

В большинстве работ, посвященных разделению смесей, исследовались лишь смеси инертных газов друг с другом, причем об изменении состава смеси в разряде судили по изменению спектрального излучения смеси вдоль столба разряда. Однако, как отмечено в [5], основной недостаток такого метода заключается в том, что он не может дать количественных сведений об изменении концентрации компонентов смеси, так как интенсивность спектральной линии определяется не только концентрацией газа, но и условиями возбуждения, которые не одинаковы в разных частях положительного столба при наличии разделения. В [4, 5] разделение смесей инертных газов исследовалось несколько усовершенствованным методом: спектральному анализу подвергались пробы газа, отсасываемые из приэлектродных частей разряда. Была получена зависимость времени разделения от давления газа, разрядного тока и концентрационного состава смеси. Скорость разделения не определялась вообще.

В [6] спектральнофотометрическим методом исследовалась скорость разделения смесей инертных газов друг с другом, с водородом и ртутью, но результаты опубликованы в основном для смесей $\text{Ne}-\text{Kr}$.

Нами исследовались время и скорость разделения смесей $\text{Ne}-\text{H}_2$ и $\text{He}-\text{H}_2$. Как уже упоминалось, можно взять такие примеси водорода, что при переключении тока скачком от 10–50 *ма* до 300–500 *ма* положительный столб сначала будет однородным, затем у анода появятся страты и граница между слоистым и однородным положительным столбом начнет передвигаться к катоду и, наконец, займет какое-то определенное положение в трубке. Этот момент принимался нами за момент установления стационарного состояния. Правда, при изменении состава смеси сами страты тоже могут изменяться по частоте и длине, но это настолько быстрый процесс, что возможное завышение времени разделения лежит в пределах ошибок измерений. Так это время, прошедшее с момента переключения тока до установления границы между стратами и однородным положительным столбом, и есть время разделения. Изменяя же время прохождения этой границы через различные участки трубки, можно получить скорость разделения с момента появления страт у

анода до окончания разделения. Все приведенные ниже результаты являются усредненными по данным трех измерений.

На рис. 2 изображена зависимость времени разделения от тока для Ne—H_2 при давлении Ne 12 мм рт. ст. Как видно, время разделения уменьшается с ростом тока. Пунктиром показана зависимость времени появления страт у анода от тока. Подобные результаты были получены и для давлений Ne 8 мм рт. ст. и 16 мм рт. ст. (см. табл. 2).

Таблица 2

Время разделения от тока в Ne—H_2 . Диаметр трубки 8 мм, длина трубки 60 см

P_{Ne} , мм рт. ст.	P_{H_2} , мм рт. ст.	H_2 , %	i , ма	t , разд. сек
8	0,31	3,9	350	6,2
			450	3,8
			500	2,4
	0,33	4,1	350	10,0
			450	8,3
			500	7,2
	0,38	4,7	350	12,0
			450	9,5
			500	8,4
16	0,32	2,0	350	5,8
			450	4,2
			500	3,3
	0,35	2,2	350	10,0
			450	6,5
			500	4,5
	0,38	2,4	350	20
			450	16
			500	14,3

При этом время разделения увеличивается с ростом давления Ne в смесях с одинаковым процентным содержанием H_2 (ср. Ne—12 и Ne—16). Оно возрастает также с ростом процента примеси водорода.

На рис. 3 показана зависимость времени разделения от тока для Ne—H_2 при давлении Ne 12 мм рт. ст. Несмотря на значительно больший процент примеси водорода, при котором возможно было производить измерения, время разделения здесь значительно меньше, чем в Ne—H_2 при том же давлении. Пунктиром опять показана зависимость времени появления страт от тока. Аналогичная зависимость получена и для Ne—H_2 при давлении Ne 16 мм рт. ст. и концентрациях H_2 8, 8,3 и 8,8%.

Для измерения скорости разделения были построены кривые, показывающие, через какое время после резкого переключения тока граница слоистого столба проходила определенные участки трубки. По наклону этих кривых можно судить о скорости разделения. Во всех случаях эти кривые аналогичны кривым на рис. 4. Из рис. 4 видно, что скорость в процессе разделения не остается постоянной: в первый момент она наибольшая и затем постепенно уменьшается. Это отмечено и в [6]. В гелии скорость разделения значительно выше, чем в неоне. На рис. 5 показана

страт требовались меньшие концентрации водорода, поэтому были измерены время и скорость разделения при концентрациях H_2 1,5, 1,6, 1,9%. Несмотря на это, время разделения здесь значительно больше, чем для Ne при 8 мм рт. ст. в трубке диаметром 8 мм (ср. таблицы 2 и 3).

Скорости разделения здесь соответственно меньше, чем в узкой трубке.

Таблица 3

Время разделения в зависимости от тока. Ne — H_2 $P_{Ne} = 8$ мм рт. ст., диаметр = 17,5 мм, длина трубки 60 см

P_{H_2} , мм рт. ст. и H_2 , %	0,12 1,5%			0,13 1,6%			0,15 1,9%			
	i , ма	350	450	500	350	450	500	350	450	500
t , разд., сек	7,4	4,4	3,0	16,8	11,0	8,8	22,5	15,6	12,1	

Подвижные страты в смесях инертных газов

Опыты проводились в бинарных смесях инертных газов Ne—Ar, Ne—Kr, Ne—Kr и Ne—Ne. Данные о подвижных стратах в этих смесях приведены в таблицах 4—7. Прочерк означает отсутствие страт при всех использованных токах, а цифры указывают верхний граничный ток существования страт в ма (при больших токах столб однороден).

Таблица 4

Подвижные страты в Ne — Ar. Диаметр трубки 24 мм, длина 60 см

Давление смеси, мм рт. ст.	Примесь Kr			
	4%	20%	40%	50%
20	—	—	—	350
16	—	—	—	330
12	—	—	700	350
8,5	—	—	600	380
6	—	—	600	400
4	—	410	600	500
2	—	800	800	760
0,7	—	>1000	>1000	>1000

Таблица 5

Подвижные страты в Ne — Kr. Диаметр трубки 24 мм, длина 60 см

Давление смеси, мм рт. ст.	Примесь Kr				
	4%	10%	40%	50%	60%
25	—	—	—	—	190
20	—	—	—	—	200
16	—	—	—	—	230
13	—	—	—	—	250
6,6	—	—	—	200	310
4,0	—	—	300	400	380
2,0	—	400	600	700	500
1,0	—	400	>1000	>1000	>1000
0,6	—	>1000	>1000	>1000	>1000

Из этих таблиц видно, что при всех использованных токах можно погасить страты в He в области давлений 0,6—20 мм рт. ст., прибавляя 2—4% Kг или Ag; прибавление 20% Ag позволяет достигнуть этого только при давлениях He выше 6 мм рт. ст. и т. д. Таким образом, с увеличением процента легкоионизируемой примеси однородный столб можно получить только при больших давлениях.

Аналогичные результаты получены и в смеси He—Kг (табл. 6).

В данной смеси прибавлением 1,6—4% Kг можно погасить страты при всех токах, начиная с давления смеси 16 мм рт. ст. С ростом общего давления смеси верхняя граница существования страт понижается, так что область токов, где столб однороден, расширяется.

Эксперименты проводились также со смесью He—Ne при давлении смеси, меньшем 1 мм рт. ст.

В чистом гелии при давлениях в интервале 1—0,1 мм рт. ст. нижний граничный ток возрастает с уменьшением давления от нескольких десятков ма до многих сотен [10]. В неоне при этих давлениях страты возникают при всех использованных токах. Таким образом, плазма однородного положительного столба в He более устойчива, чем в Ne. Поэтому интересно исследовать смесь этих газов. Обнаружено, что прибавление неона к гелию понижает нижние граничные токи (табл. 7).

Таблица 6

Подвижные страты в He—Kг. Диаметр трубки 24 мм, длина 60 см

Давление смеси, мм рт. ст.	Примесь Kг		
	1,6%	4%	9%
25	—	—	—
22	—	—	180
19	—	—	200
16	—	—	200
11	280	240	330
6	600	450	500
3	>1000	>1000	>1000

Таблица 7

Нижние граничные токи возникновения страт смеси He—Ne (ма). Диаметр трубки 30 мм, длина 60 см

Давление смеси, мм рт. ст.	Ne, %	Давление смеси, мм рт. ст.			
		0	10	30	50
0,6		380	290	200	40
0,4		830	700	550	410

Выводы

Таким образом, эксперименты показали, что прибавление водорода к гелию, неону и аргону в количестве нескольких процентов гасит подвижные страты. Такое же влияние оказывает прибавление 2—4% аргона и криптона к гелию. Необходимо отметить, что во всех этих случаях, за исключением смеси Ag—H₂, метастабильный потенциал основного газа выше потенциала ионизации атомов примеси. В таких условиях энергия метастабильных состояний может перейти в энергию ионизации при столкновении атомов основного газа с атомами примеси. В результате интенсивность ступенчатой ионизации должна ослабляться. Поскольку

во всех рассмотренных случаях путем прибавления легкоионизируемой примеси можно добиться полного гашения страт, то можно утверждать, что среди элементарных процессов, ответственных за подвижные страты, ступенчатая ионизация играет большую роль. То обстоятельство, что гашение страт происходит и в смеси $\text{Ag}-\text{H}_2$, указывает на возможность и других элементарных процессов, приводящих к образованию страт.

Наиболее эффективное гашение страт в бинарных смесях инертных газов происходит при малых количествах (2—4%) легкоионизируемой примеси. При большем процентном содержании эта эффективность падает, так как концентрация атомов примеси становится достаточной для образования страт, характерных для примеси.

Увеличение примеси неустойчивого к стратам неона к более устойчивому гелию при малых давлениях приводит к расширению области существования страт по току.

Явление постепенного образования страт по мере разделения компонентов смеси газов позволяет измерить время разделения смесей и установления стационарного распределения состава газа по длине разрядной трубки.

Интересно отметить, что при давлениях Ag , больших, например, 11 мм рт. ст., в смесях $\text{Ag}-\text{H}_2$ наблюдалась также и нижняя граница токов возникновения страт. Причем в большинстве случаев возникновение страт в этой смеси сопровождалось видимым сжатием разряда к оси трубки, так что нижняя граница токов возникновения страт соответствует токам возникновения шнура.

Аналогичное явление имеет место также в чистом Ne при давлении 40 мм рт. ст. При уменьшении тока до 100 ма наблюдается внезапное исчезновение страт и отчетливо выраженной контракции. Однако при этом остаются какие-то нестратовые колебания частоты ниже 1 кГц, связываемые нами с радиальной пульсацией шнура. При увеличении тока страты и контракция появляются скачком при токе 120 ма (частота страт $\sim 2,5$ кГц).

ЛИТЕРАТУРА

1. Kenty C. Phys. Rev., 8, 95, 1950.
2. Зайцев А. А., Васильева М. Я. «Изв. вузов», радиофизика, 5, № 3, 523, 1962.
3. Dryvesteyn. Physica, 2, 255, 1935.
4. Фриш С. Э., Матвеева Н. А. ДАН СССР, 122, № 3, 375, 1958.
5. Матвеева Н. А. «Вестн. ЛГУ», сер. физ. и хим., № 4, вып. 1, 11, 1959.
6. Крыжанский К. Н. Ann. Phys., 2, No. 7, 263, 1958.
7. Scaury F. Zs. f. Phys., 2, 213, 1920.
8. Клярфельд Б. Н., Полетаев И. А. ДАН СССР, 23, 459, 1939.
9. Фриш С. Э. и Шрейдер Е. Я. «Изв. АН СССР», сер. физ., 13, 465, 1949.
10. Зайцев А. А. и Васильева М. Я. «Радиотехника и электроника», вып. 7, № 3, 557, 1962.

Поступила в редакцию
2. 6 1964 г.

Кафедра
электроники