для η'':

$$\eta_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{1}{3}[(k_2^2 \mp \delta_3\delta_2)^2 - (\delta_2^2 + \delta_3^2 \pm 2k_2^2)^2]}.$$

Для систем с к. с. характер кривых *2* и *3* такой же, как и для систем с р. с., только экстремальные значения немного больше разнесены по оси ординат. Соответственные частотные кривые *5* для системы с к. с. и *4* для системы с р. с. представлены на рис. 2. Как видно из графика, кривая *5* имеет пологий устойчивый участок вблизи области синхронизма, который может быть использован для стабилизации частоты.

Рассмотрение влияния запаздывания в нелинейном элементе может быть проведено аналогично случаю двухконтурной системы. Характер влияния запаздывания на частотную кривую при фиксированном γ совпадает в обоих случаях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ирисов Е. А., Хохлов Р. В. «Вестн. Моск. ун-та», сер. мат., мех., астрон., физ., химии, № 2, 1958.
2. Карнаух А. И., Пителин А. П. «Вопросы радиоэлектроники», сер. 1, № 5, 1959.
3. Уткин Т. М., Хрюнов А. В., Снедков Б. А. Отчет НИР, МЭИ, № 23386 от 15. 5 1961 г.
4. Курдюмов О. А., Минакова И. И. «Вестн. Моск. ун-та», сер. физ., астрон., № 1, 1966.
5. Курдюмов О. А., Минакова И. И. «Вестн. Моск. ун-та», сер. физ., астрон., № 4, 1966.

Поступила в редакцию
10. 11 1966 г.

Кафедра
физики колебаний

А. А. ЗАЙЦЕВ, Н. А. МИСКИНОВА

УДК 537.56 : 533.27

О НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВАХ ПОДВИЖНЫХ СТРАТ ПРИ СРЕДНИХ ДАВЛЕНИЯХ

Подвижные страты при средних давлениях экспериментально изучены мало. В данной работе проводились систематические исследования параметров подвижных страт в неоне при давлениях 8—40 *мм рт. ст.*, а также в смеси неона с водородом при давлении неона 8 *мм рт. ст.* и давлениях водорода до 0,5 *мм рт. ст.* Условия опытов и техника измерений аналогичны описанным в [1—3].

Эксперименты показали, что длина страт в неоне уменьшается с ростом тока и давления, как изображено на рис. 1. При этом частота страт, как правило, слабо уменьшается. Следовательно, скорость страт уменьшается при увеличении тока. Например, в трубке диаметром 1,5 *см* при давлении неона 8 *мм рт. ст.* увеличение тока от 30 до 700 *ма* приводит к уменьшению скорости страт от $12{,}8 \cdot 10^3$ до $5{,}8 \cdot 10^3$ *см/сек.*

С ростом давления частота страт f уменьшается [4]. Однако это выполняется только для малых значений pR, а в области средних давлений картина несколько меняется. В табл. 1 приводятся значения Rf от pR в Ne при $pR > 10$.

Таблица 1

pR, *мм рт. ст. см*	10,4	19,5	26	39	52
Rf 10^{-3}, *см·сек*$^{-1}$	1,75	1,75	1,82	2,0	2,86

В Ne при $pR \gtrsim 20$ частота страт возрастает при увеличении давления, в Ar это явление наблюдается при $pR \geqslant 5$, в Xe уже при $pR \gtrsim 3{,}5$, а в He при $pR \approx 20$ подобное возрастание частоты страт еще не обнаруживается. Такой характер зависимости $f(p)$, начиная с некоторых значений pR, может быть связан со значительным уменьшением

плотности газа на оси, а также с уменьшением эффективного радиуса тока в результате наступления контракции разряда. Видимо, этой же причиной объясняется и расхождение в области больших давлений кривых зависимости верхних граничных токов исчезновения страт от давления газа для трубок разных диаметров, показанное на рис. 2. Для сравнения пунктиром приведены значения этих токов из [5], измеренные для небольших давлений газов и, как известно, не зависящие от радиуса трубок. И в этом случае отступления от прямых из [5] наблюдаются в Ar при меньших давлениях, чем в Ne, а в Ne в свою очередь при меньших давлениях, чем в He.

С помощью подвижных страт в [1—2] исследовалось разделение компонентов смесей неона и гелия с водородом, а также влияние примеси водорода на граничные токи в этих газах. Однако определенный интерес представляет собой изучение влияния примеси водорода на параметры самих страт и установление связи этих параметров с процессом разделения. Поэтому в данной работе прослеживается зависимость вдоль столба длины, час-

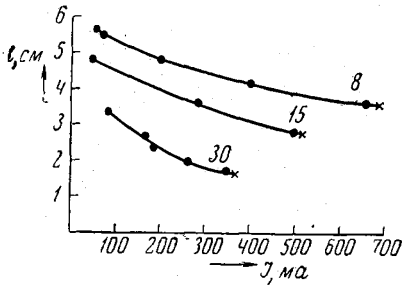

Рис. 1. Длина страт в неоне в зависимости от разрядного тока. Цифры у кривых означают давление неона в *мм рт. ст.* Диаметр трубки 2,6 *см*

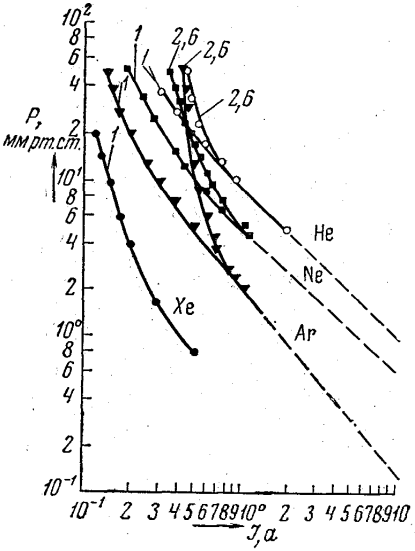

Рис. 2. Зависимость верхних граничных токов страт от давления газа. Цифры у кривых указывают диаметр трубки в *см*. Пунктиром показаны прямые, взятые из [5]

тоты и амплитуды подвижных страт в неоне от величины примеси водорода у катода. Диаметр трубки 10 *мм*, а расстояние между анодом и катодом 59 *см*.

Обнаружено, что добавление малых количеств водорода (до 0,1 *мм рт. ст.*) практически не влияет на параметры страт, а именно: длина, частота и амплитуда их остаются постоянными вдоль трубки при всех разрядных токах в интервале от 50 до 750 *ма* и близкими к их значениям в чистом неоне ($f \approx 3{,}5$ *кгц*; $l \approx 2{,}2$ *см* при токе 450 *ма*), причем характер изменения этих величин при изменении тока такой же, как в чистом газе. Добавление 0,14 *мм рт. ст.* водорода вызывает некоторое увеличение частоты страт (до 4,5 *кгц*). При $pH_2 = 0{,}17$ *мм рт. ст.* и токах до 200 *ма* частота страт возрастает уже до 6 *кгц*, оставаясь все же постоянной вдоль трубки; при бо́льших токах она несколько понижается. Начиная с $pH_2 = 0{,}23$ *мм рт. ст.* наблюдается увеличение частоты страт к катоду в 2 и более раза по сравнению с ее значением у анода и убывание длины и амплитуды в этом направлении. При этом, чем меньше ток (или больше примесь водорода), тем более плавно меняются параметры страт вдоль трубки, а резкие изменения этих величин по длине столба наблюдаются при тех бо́льших токах, чем больше примесь водорода. При бо́льших токах страты более низкой частоты занимают бо́льшую часть трубки (от анода); то же относится и к случаю меньшей примеси водорода. Все сказанное иллюстрирует табл. 2, где приводятся значения частоты f, длины l, амплитуды A страт для разных токов I и на разных расстояниях от анода x в смеси Ne с 0,29 *мм рт. ст.* H_2 (амплитуда в условных единицах). Прочерк означает отсутствие надежных измерений длины страт.

В смеси с содержанием водорода 0,32 *мм рт. ст.* при токах меньших 400 *ма* частота страт практически не меняется вдоль столба, но она превышает частоту страт в чистом неоне примерно на порядок ($f \approx 30$—35 *кгц*), амплитуда страт, напротив раз в пять меньше, а длина $l \approx 1{,}5$ *см*. Эти страты характеризуются также повышенной по сравнению с чистым неоном скоростью движения ($\sim 4 \cdot 10^4$ *см/сек*), поэтому в дальнейшем их будем называть условно «быстрыми». Заметим также, что направление их движения такое же, как в чистом газе. При токе в 380 *ма* эти страты исчезают, так что этот ток можно считать верхним граничным ($I_{в.гр}$) для этого типа страт. В интервале токов от 380 до 450 *ма* столб остается свободным от страт. Но при токе 450 *ма*

Таблица 2

I, *ма*	100			200			300			500		
x, *см*	*a*	*f*, *кгц*	*l*, *см*	*A*	*f*	*l*	*A*	*f*	*l*	*A*	*f*	*l*
10	23			36	5,2		33	4,6	2,0	33	4,2	2,4
20	22			34	7,4		30	4,7	1,9	33	4,5	2,4
30	21	21	—	25	10	—	18	9,2	1,8	23	4,5	1,6
35	20			20	19,5		6	9,3	1,7	21	4,5+ 8,8	—
40	19			18	19,5		4	9,3	1,7	20	8,8	—
50	16									5	8,9	1,4

у анода появляются страты с амплитудой, близкой к ее значению в неоне, но убывающей до нуля на расстоянии ~ 10 *см* от анода, так что далее к катоду остаются только слабые синфазные колебания; частота страт 7,1 *кгц* длина ~ 2 *см*. С дальнейшим ростом тока частота этих страт, которые впредь будем условно называть «неоновыми», несколько понижается, амплитуда возрастает; расширяется к катоду и область слоистого столба в трубке (так, при $I=700$ *ма*, $f=6{,}1$ *кгц*, $l\approx 2$ *см*, амплитуда страт убывает до нуля на расстоянии $x_0=27$ *см* от анода). При $pH_2=0{,}35$ *мм рт. ст.* частота «быстрых» страт возрастает до 38 *кгц*, $I_{в.гр}$ понижается до 330 *ма*, и страты частоты порядка 7 *кгц* появляются лишь при токе ~ 500 *ма*, а их амплитуда убывает до нуля на меньшем расстоянии от анода (при $I=700$ *ма* и $x_0=14$ *см*). Увеличение примеси водорода до 0,45 *мм рт. ст.* приводит к возрастанию частоты «быстрых» страт до 43 *кгц*, уменьшению их длины до 1,2 *см*; $I_{в.гр}=40$ *ма*, а неоновые страты не появляются вообще даже при токе 800 *ма*. Наконец, при $pH_2=0{,}5$ *мм рт. ст.* нет никаких стратовых колебаний вплоть до $I=800$ *ма*. Очевидно, две последние примеси водорода столь велики, что степень разделения смеси, достигаемая при токах меньших верхнего граничного для «неоновых» страт, недостаточна для их появления. Параллельно проводившиеся измерения колебаний напряжения на электродах трубки показали, что характер зависимости их амплитуды от тока и примеси водорода совершенно аналогичен зависимости амплитуды колебаний яркости у анода от соответствующих величин. При этом максимальное значение амплитуды колебаний напряжения составляло ~ 10 *в*, а минимальное — 1 *в*.

Все приведенные явления указывают на связь параметров и области существования страт по току и по длине столба с процессом разделения компонентов смеси, что предполагалось в [1—2]. Однако следует отметить, что в данной работе при больших примесях водорода или слабых токах в разряде были обнаружены «быстрые» страты небольшой амплитуды с частотой, значительно превышающей частоту страт в чистом неоне и со своим значением верхнего граничного тока. Таким образом, нижние граничные токи в [1—2] относятся, собственно говоря, к появлению «неоновых» страт. Граница между слоистым и однородным столбом в [1—2] в ряде случаев сохраняет свой первоначальный смысл, а в некоторых случаях является границей между областями столба с «быстрыми» и «неоновыми» стратами. Но во всех случаях ее можно считать границей между областями разряда с сильно отличающимися концентрациями водорода, а по самому значению частоты страт можно, в некотором смысле, судить о величине концентрации водорода в данном месте трубки. Что касается определения времени и скорости разделения смеси с помощью подвижных страт, то способ измерения этих величин, предложенный в [1—2], остается в силе, так как по-прежнему их можно определять по моментам установления стационарной амплитуды страт в различных местах трубки и на границе.

Таблица 3

pH_2, *мм рт. ст.*	0,32				0,35			
ВЧ-поле	нет		есть		нет		есть	
I, *ма*	*u*	*t*	*u*	*t*	*u*	*t*	*u*	*t*
300	320	8,8	300	12,5	335	15,9	305	17,5
400	280	6,9	260	9,2	300	14,1	280	15,4
500	260	4,1	245	5,0	280	12,2	265	13,1
600	250	2,2	235	2,6	265	10,0	255	10,4
700	—	—	—	2	260	7,9	250	8,3

В [6] высказано предположение о зависимости скорости процесса разделения смеси от величины продольного электрического поля E. В настоящей работе путем воздействия на разряд высокочастотным полем ($f \approx 10$ *мггц*) достигалось некоторое уменьшение E. В табл. 3 приведены значения времени разделения t (*сек.*), измеренного с помощью подвижных страт, в зависимости от тока для двух концентраций водорода у катода как в отсутствие ВЧ-поля, так и при его наложении на разряд (u — напряжение между анодом и катодом в вольтах).

Как можно заметить при рассмотрении этой таблицы, уменьшение E при наложении ВЧ-поля действительно приводит к некоторому замедлению процесса разделения, тем более заметному, чем более значителен вклад ВЧ-поля в суммарную мощность разряда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильева М. Я. Зайцев А. А., Мискинова Н. А. «Вестн. Моск. ун-та», сер. физ., астрон., № 6, 1965.
2. Васильева М. Я., Зайцев А. А., Мискинова Н. А. Доклад на I Всесоюзной конференции по газоразрядным приборам. Рязань, 1964.
3. Зайцев А. А., Васильева М. Я., Андрюхина Э. М. «Изв. АН СССР», сер. физич., **23**, 995, 1959.
4. Зайцев А. А., Швилкин Б. Н. ДАН СССР, **172**, 565, 1967.
5. Druyvesteyn M., Penning F. Rev. Mod. Phys., **12**, No. 2, 87, 1940.
6. Krysmansky K. H. Ann. der Phys., **2**, 7, No. 5—6, 265, 1958.,

Поступила в редакцию
25. 11 1966 г.

Кафедра
электроники