

04:07;12

©1995 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЫОНИЗАЦИИ ГАЗОВОЙ ОБОЛОЧКИ Аг ЛАЙНЕРА

Р.Б.Бахит, А.Г.Русский, А.В.Федюнин

Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055, Томск, Россия
(Поступило в Редакцию 16 мая 1994 г.)

Приведены результаты измерений концентрации и скорости ионизованных частиц в струе Аг лайнера. Ионизация газа осуществлялась с помощью электрического разряда по поверхности диэлектрика. Измерения проводились с помощью двойного зонда с приложенной разностью потенциалов $U = 23$ В. Измерения проводились при различных начальных условиях, таких как давление на входе клапана P , времени задержки T_z срабатывания искры ионизации относительно момента открытия газового клапана, геометрии расположения искры ионизации и качества обработки сопла Лавала.

Введение

Газовые лайнеры в настоящее время являются общепризнанными источниками мощного рентгеновского излучения [1,2]. Как правило, для создания токового слоя в таких лайнерах необходимо создание предварительной ионизации газа. В мощных ускорителях на водяных линиях предыонизация обеспечивается током, протекающим через газ при зарядке водяных линий [3]. В индуктивном накопителе предимпульсный ток мал и, как показали эксперименты [4], необходима достаточно интенсивная УФ подсветка. В данной работе мы поставили перед собой задачу исследования характера предыонизации в газовой струе лайнера, что позволит обеспечить лучшее понимание процесса формирования токового слоя в лайнере.

В работе [4] по сжатию газовых лайнеров на установке с индуктивным накопителем тока ГИТ-4 была обнаружена сильная качественная и количественная зависимость степени сжатия лайнера от предыонизации газовой оболочки. При изменении геометрии расположения искры предыонизации и/или времени между зажиганием искры предыонизации и временем подачи тока в нагрузку параметры сжатого лайнера менялись достаточно сильно. При отсутствии предыонизации сжатие газовой оболочки происходило вяло и крайне неравномерно. В случае

интенсивной предыонизации сжатие идет значительно более равномерно и достигает значительных величин ($k = 20$ в видимом свете). Эти факты побудили провести дополнительные исследования начального состояния газовой оболочки, ионизируемой имеющейся у нас системой предыонизации.

В ходе проведенных исследований оценивались такие параметры газовой оболочки, как концентрация ионизованных частиц и их скорость. Кроме того, необходимо было оценить степень влияния на вышеречисленные параметры таких факторов, как давление на входе клапана P , время задержки T_3 срабатывания искры предыонизации относительно момента открытия газового клапана, геометрии расположения искры предыонизации, а также фактор старения сопла. Необходимо заметить, что исследования носили скорее качественный, нежели количественный характер.

Методика измерений

Исследования проводились на стенде (рис. 1), состоящем из вакуумной камеры, системы напуска газа, которая аналогична системе, используемой в экспериментах на установке ГИТ-4, и электрического зонда.

Система напуска газа представляет собой расположенные последовательно газовый клапан и кольцевое сверхзвуковое сопло Лавалья, с помощью которого и создается газовая оболочка. Диаметр критического сечения сопла 12 мм. Концентрация газа в оболочке лайнера менялась в пределах $N = 1-7 \cdot 10^{17}$ л/см³. С помощью относительно простого двойного зонда [5] с приложенной разностью потенциалов $U = 23$ В (зонд не имел гальванической связи с электрическим контуром стенда) оценивалась концентрация ионов в газовой оболочке лайнера как функция времени. Зонд был выполнен в виде двух параллельных сеток, расположенных поперек газовой струи (рис. 1). Расстояние

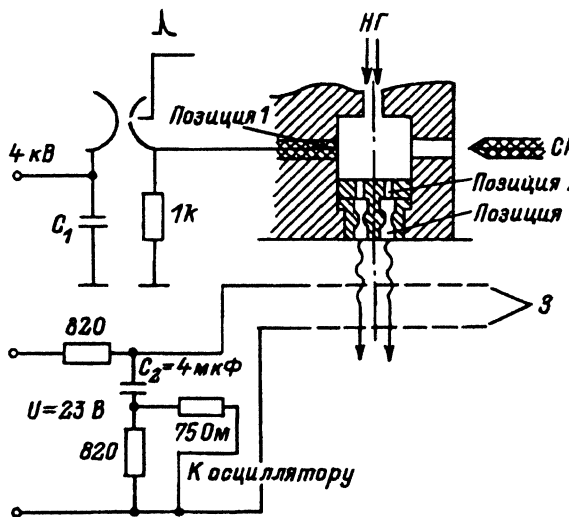


Рис. 1. Система экспериментальной установки.

НГ — система напуска газа, З — двойной зонд, СР — синхронизирующий разрядник.

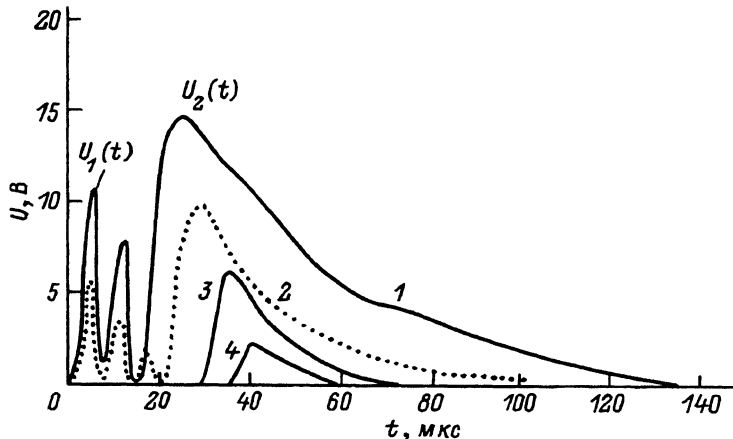


Рис. 2. Осциллограммы сигналов двойного зонда.

Искра предыонизации находится в позиции 2; T_3 , мкс: 1, 2 — 200; 3, 4 — 600; P , атм.: 1, 3 — 1; 2, 4 — 2.5.

между сетками $d = 8$ мм. Расстояние от верхней сетки зонда до сопла варьировалось и составляло $l_1 = 3$ мм и $l_2 = 13$ мм. Схема регистрации зондовых сигналов также показана на рис. 1. Сигнал регистрировался на осциллографе С8-13 с согласующим сопротивлением $R = 75$ Ом.

Предыонизация газовой оболочки осуществлялась ультрафиолетовым излучением, сопровождающим процесс электрического пробоя по поверхности диэлектрика в газе. Для пробоя использовался периодический затухающий разряд конденсатора емкостью $C = 0.4$ мкФ, заряженного до 4 кВ. Использовалась система из трех таких электрических разрядов, расположенных по периметру сопла Лавалья и происходящих синхронно. Далее, для удобства процесс электрического пробоя и появления ультрафиолета в такой системе будем называть искрой предыонизации. Период колебаний в LC -контуре искры предыонизации составляет ≈ 12 мкс, при этом частота вспышек ультрафиолетового излучения соответствует удвоенной частоте колебаний в контуре.

Электрический сигнал с зонда $U(t)$ (рис. 2), который появляется синхронно с началом свечения искры предыонизации и характеризует концентрацию носителей заряда в объеме зонда, условно можно разделить на две составляющие $U_1(t)$ и $U_2(t)$. Пусть первая составляющая $U_1(t)$ соответствует процессу ионизации, происходящему непосредственно в объеме зонда под воздействием прямой фотоионизации. При этом скорость ухода носителей тока v_u из объема зонда будет определяться [5] разностью потенциалов, приложенной к сеткам зонда, и концентрацией газа в объеме зонда N_i . Вторая составляющая зондового сигнала $U_2(t)$ будет соответствовать вкладу, который дает ионизованный газ, поступающий в область зонда с потоком газа со скоростью v_i . Из специально проведенных измерений было выяснено, что скорость ухода носителей тока из объема зонда v_u под действием приложенного потенциала значительно превышает скорость поступления ионизованного газа в объем зонда v_i . Таким образом, если уровень сигнала $U_1(t)$ определяется величиной v_u , то уровень сигнала $U_2(t)$ определяется величиной v_i . Если искра предыонизации расположе-

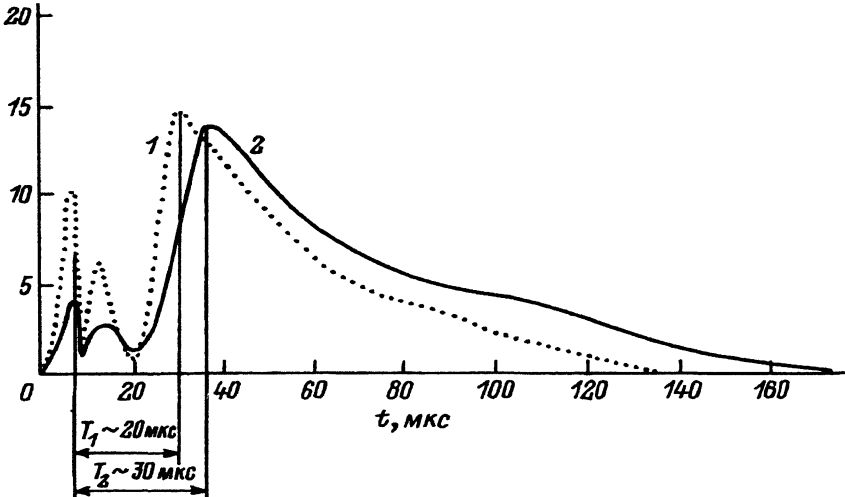


Рис. 3. Оциллограммы сигналов двойного зонда.

Искра предыонизации находится в позиции 2; $T_3 = 200$ мкс, $P = 1$ атм; 1 — $l_1 = 3$, 2 — $l_2 = 13$ мм.

на на некотором расстоянии L от зонда, то сначала будет преобладать сигнал $U_1(t)$, так как прямая фотоионизация газа в объеме зонда происходит синхронно со вспышкой ультрафиолета, а область максимально ионизированного газа еще не дошла до зонда. Затем вклад составляющей $U_2(t)$ будет увеличиваться и по прошествии времени, необходимого для прилета основной массы ионизированных частиц в область зонда $t_{пр} = L/v_i$, он будет максимален. Если время $t_{пр}$ больше, чем время свечения искры предыонизации $t_{св}$, то через промежуток времени $t_{св}$ после начала свечения искры предыонизации будет присутствовать только составляющая $U_2(t)$. Можно оценить концентрацию заряженных частиц в области зонда для двух случаев: а) когда присутствует только составляющая $U_1(t)$ и б) когда присутствует только составляющая $U_2(t)$. Далее для удобства будем говорить о случаях а или б.

В общем случае для слабоионизованного газа плотность тока в зонде связана с концентрацией заряженных частиц как

$$j(t) = e \cdot N_i(t) \cdot v, \quad (1)$$

где v — скорость носителей тока поступающих на обкладки зонда, e — заряд электрона.

Тогда, учитывая, что

$$j(t) = \frac{I(t)}{S} = \frac{U(t)}{R \cdot S},$$

где $I(t)$ — ток в цепи зонда, S — площадь поперечного сечения газовой оболочки, R — входное сопротивление осциллографа, $U(t)$ — уровень сигнала с зонда, получаем

$$\langle N_i(t) \cdot v \rangle = \frac{U(t)}{R \cdot S \cdot e}. \quad (2)$$

Для оценки скорости v_i были измерены времена появления сигнала с зонда относительно момента срабатывания искры предыонизации T_1 и T_2 для двух различных расстояний между зондом и выходом из сопла l_1 и l_2 (рис. 3). Зная разность времен $\Delta T = T_2 - T_1$ и разность расстояний $\Delta l = l_2 - l_1$, можно оценить скорость v_i как $v_i = \Delta l / \Delta T = 0.8 - 1.0 \cdot 10^5$ см/с.

Безусловно, абсолютная концентрация ионов N_i как для случая а, так и для случая б значительно меняется не только во времени, но и по длине лайнера, кроме того, как отмечалось выше, N_i зависит от давления газа на входе клапана, сорта газа, геометрического расположения искры предыонизации и качества поверхности сопла. Рассмотрим каждый из этих случаев отдельно.

Оценка влияния геометрии расположения искры предыонизации на величину N_i

Для того чтобы выяснить влияние геометрии расположения искры предыонизации на величину N_i , предыонизация располагалась в трех различных позициях 1-3, как показано на рис. 1. В позиции 1 искра предыонизации располагалась в форкамере газового клапана на расстоянии 1 см от входа в сопло. В данном случае зонд (рис. 1) располагался вне зоны прямой видимости искры предыонизации. В позиции 2 предыонизация располагалась непосредственно перед входом в сопло Лавалья и, таким образом, зонд находился в зоне прямой видимости искры предыонизации. В позиции 3 предыонизация располагалась на выходе из сопла Лавалья на расстоянии 5 мм от зонда.

Для этих трех случаев были сняты осциллограммы сигналов с зонда при различном времени T_3 и давлении P на входе клапана. Осциллограммы сигналов с зонда на рис. 4 соответствуют случаю, когда предыонизация находится в позиции 1. Из этих осциллограмм видно, что составляющая $U_1(t)$ отсутствует. Следовательно, прямая фотоионизация газа в объеме зонда также отсутствует. В этом случае зондовый сигнал соответствует только тому ионизованному газу, который поступает в объем зонда, двигаясь со скоростью v_i (составляющая $U_2(t)$). Осциллограммы сигналов с зонда на рис. 2 соответствуют случаю, когда предыонизация находится в позиции 2. В этом случае

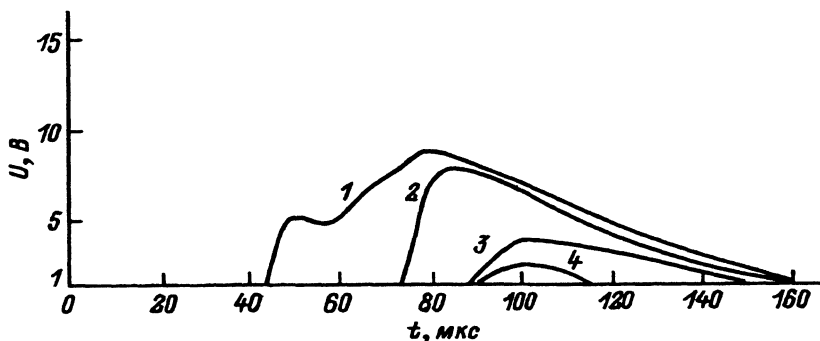


Рис. 4. Осциллограммы сигналов двойного зонда. Искра предыонизации находится в позиции 1; T_3 , мкс: 1 — 100; 2, 4 — 200; 3 — 600; P , атм.: 1-3 — 1, 4 — 2.5.

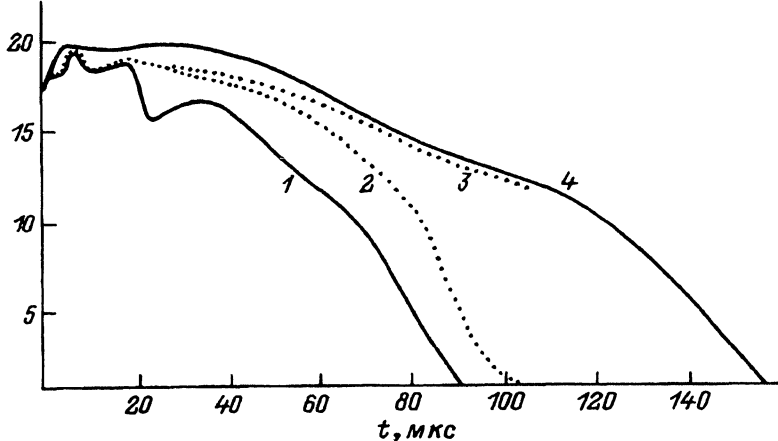


Рис. 5. Осциллограммы сигналов двойного зонда.

Искра предыонизации находится в позиции 3; T_3 , мкс: 1, 2 — 600; 3, 4 — 200; P , атм.: 1, 4 — 1, 2, 3 — 2.

присутствуют составляющие как сигнала $U_1(t)$, так и $U_2(t)$. Следовательно, можно утверждать, что в объеме зонда появляется ионизованный газ как за счет прямой фотоионизации, так и за счет поступления ионизованного газа двигающегося со скоростью v_i . И наконец, осциллограммы сигналов с зонда на рис. 5 соответствуют случаю, когда предыонизация находится в позиции 3. Из-за того что искра предыонизации находилась в непосредственной близости от зонда, составляющие $U_1(t)$ и $U_2(t)$ неразделимы. В этом случае вклад носителей тока поступающих в объем зонда со скоростью v_i соизмерим с вкладом ионизованных частиц, появляющихся непосредственно в объеме зонда вследствие прямой фотоионизации и вытягиваемых из этого объема со скоростью v_u .

Учитывая все вышесказанное, для наглядности можно составить таблицу максимальной величины $\langle N_i v \rangle$ в струе газа (табл. 1) при различных P и T_3 для случаев а и б. Можно заметить, что величина $\langle N_i v \rangle$ в области зонда падает с увеличением T_3 и P . Для составляющей $U_2(t)$ этот факт, по всей видимости, объясняется следующим. Из рис. 2 и 4 можно оценить скорость движения газа, усредненную по всему пути от места расположения искры предыонизации до зонда v_{cp} (табл. 2). Из этих данных видно, что средняя скорость газа v_{cp} уменьшается с увеличением T_3 и давления газа P на входе клапана. Таким образом, газ преодолевает расстояние от искры до зонда за большее время, а значит, и время на рекомбинацию увеличивается. Кроме того, согласно [5], время рекомбинации ионизованного газа уменьшается с увеличением концентрации газа. Таким образом, возможны ситуации, когда при достаточно больших значениях P , T_3 или длины лайнера до дальнего электрода долетит уже практически полностью рекомбинировавший газ. Для составляющей $U_1(t)$ факт уменьшения концентрации заряженных частиц с увеличением T_3 и P объясняется тем, что коэффициент поглощения УФ излучения с энергией выше порога фотоионизации газа имеет значительную величину и увеличивается пропорционально концентрации газа в оболочке. Так, согласно формуле Унзольда-Крамера

Таблица 1. Максимальная величина $\langle N_i v \rangle$ для различных T_3 , P и геометрии расположения искры предьонизации

Геометрия расположения предьонизации	Составляющая зондового сигнала	P , атм.	T_3 , мкс	$\langle \langle N \cdot v \rangle \rangle \cdot 10^{17}$ 1/см ² ·с
Позиция 1	$U_2(t)$	1	100	9
		1	200	8
		1	600	3
		2.5	200	1.1
Позиция 2	$U_1(t)$	1	200	1.2
				$U_2(t)$
	$U_1(t)$	2.5	200	0.6
				$U_2(t)$
	$U_1(t)$	1	600	—
				$U_2(t)$
	$U_1(t)$	2.5	600	—
				$U_2(t)$
Позиция 3	Не делимы	1.0–2.5	200–600	≥ 30

Таблица 2. Скорость движения газа V_{cp} , усредненная по всей длине пути при различных T_3 и P

T_3 , мкс	P , атм.	$V_{cp} \cdot 10^4$ см/с
100	1.0	10
200	1.0	6.4
600	1.0	5.0
200	2.5	5.0

[5], длина пробега кванта с энергией фотоионизации $Ag \ h\nu = 15.8$ эВ при $N = 10^{17}$ 1/см³ равна $l_\phi = 3 \cdot 10^{-2}$ см. Таким образом, если при малых N прямая фотоионизация еще может эффективно работать на расстояниях в несколько сантиметров, то при значительных N искру предьонизации необходимо максимально приблизить к ионизируемой оболочке.

Фактор старения сопла

Для оценки влияния чистоты поверхности сопла на степень и характер предьонизации были сняты два сигнала с зонда при одинаковых P , T_3 и геометрии расположения системы предьонизации (рис. 1, позиция 2) с различными по качеству соплами. В первом случае (рис. 6) сопло было новое, во втором случае стояло ранее уже использованное сопло со следами нагара и налетом оплавленного металла. Видно, что при использовании старого сопла значительно (в 2–3 раза) уменьшается прямая фотоионизация, в то время как на степень ионизации газа, достигающего зонда позже, этот фактор влияет незначительно,

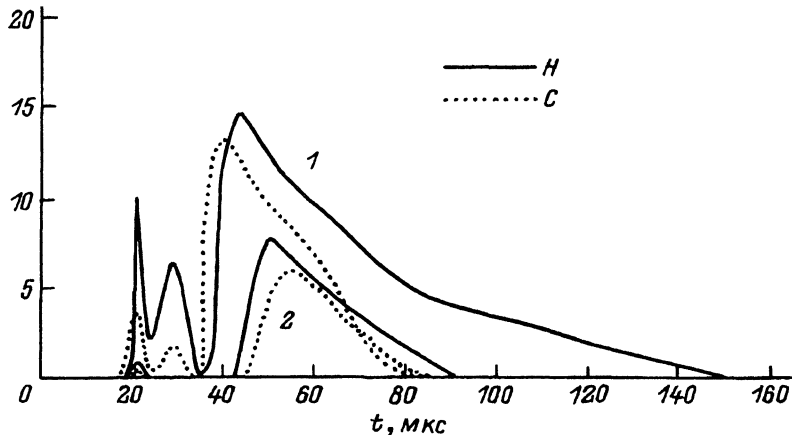


Рис. 6. Оциллограммы сигналов двойного зонда.

Искра предыонизации находится в позиции 2; H — новое сопло, C — ранее использованное сопло со следами нагара; 1, 2 — $P = 1$ атм.; T , мкс: 1 — 200, 2 — 600.

лишь слегка уменьшая концентрацию ионов, достигающих объема зонда. Таким образом, эффект переотражения УФ излучения при прямой фотоионизации играет значительную роль.

Предыонизация газового лайнера в условиях работы на генераторе тока с индуктивным накопителем

Из вышеприведенных измерений можно сделать заключение, что момент, когда максимально ионизованная часть газовой оболочки попадает в межэлектродный промежуток, казалось бы, и есть оптимальное время подачи тока в нагрузку. Однако на установке с индуктивным накопителем ГИТ-4 в момент перед переключением тока из-за конечного сопротивления плазменных ключей в межэлектродном зазоре появляется разность потенциалов ≈ 1 кВ. Время, в течение которого существует эта разность потенциалов, составляет 1.3 мкс. При этом время ухода заряженных частиц из межэлектродного промежутка (подобно процессу в зонде) значительно меньше 1 мкс. Ионизованные частицы, поступающие в межэлектродный промежуток со скоростью v_i , будут мгновенно (по сравнению со скоростью поступления) вытягиваться из межэлектродного промежутка под действием приложенной разности потенциалов, и в момент переключения тока в газовой оболочке будут отсутствовать носители зарядов. Необходимо отметить, что при тех массах газовой оболочки и геометрии сопла Лавалья, которые используются в наших экспериментах, величина, характеризующая электрическую прочность зазора с газом, $pd \leq 0.1$ мм рт.ст.·см, что, согласно кривой Пашена, соответствует напряжению пробоя значительно больше 1 кВ. Таким образом, при появлении на электродах разности потенциалов в течение того времени, когда плазменные ключи открыты, развитие самостоятельного разряда не происходит.

Решение проблемы может быть следующее. Ток в нагрузку необходимо переключать непосредственно во время свечения искры предыонизации, когда процесс ионизации в межэлектродном промежутке

идет непрерывно и во всем объеме сразу. Это было проверено в экспериментах по сжатию Ag лайнера на установке ГИТ-4 [4]. В ходе этих экспериментов ток в нагрузку подавался 1) во время свечения искры предыонизации (составляющая $U_1(t)$), 2) во время прихода в межэлектродный промежуток газа с максимальной концентрацией ионов (составляющая $U_2(t)$), 3) предыонизация отсутствовала. Все прочие условия были идентичны. Полученные результаты позволяют отметить как качественное, так и количественное отличие сжатия в этих трех случаях. Если в первом случае коэффициент сжатия достигает значительных величин, то во втором и третьем случаях сжатие слабое. По энергетике излучение в первом случае на порядок выше, чем для второго и третьего случаев. Результаты выстрелов во втором и третьем случаях практически не отличаются.

С нашей точки зрения, при отсутствии предыонизации в газовой оболочке происходит образование отдельных стримерных каналов, которые хаотично распределены по периметру лайнера. В итоге это приводит к крайне неравномерному сжатию лайнера при большой массе газа или к срыву машины в пучок электронов в случае малой концентрации частиц в газовом лайнере. В случае использования предыонизации и выполнения определенных требований к ней ток, переключенный в нагрузку, образует сплошную плазменную оболочку с высокой проводимостью и осуществляется ее равномерная имплозия.

Заключение

Стендовые исследования предыонизации газовой оболочки показали, что для осуществления имплозии газового лайнера в наших условиях необходима предварительная ионизация газа в межэлектродном промежутке. В условиях, когда используется генератор тока, в котором основному импульсу тока предшествует предимпульс напряжения, по величине недостаточный для развития самостоятельного разряда в газовой оболочке лайнера, ток в нагрузку необходимо переключать только непосредственно в момент образования ионов в межэлектродном промежутке. В случае, когда для предыонизации используется вспышка ультрафиолетового излучения (как в нашем случае), ток в нагрузку необходимо переключать в момент вспышки ультрафиолета.

В результате стендовых исследований были получены зависимости концентрации и скорости ионизованных частиц в Ag от таких параметров, как T_3 и P , что позволяет получить характеристики предыонизованной газовой оболочки, необходимые для хорошего сжатия лайнера. Кроме того, были сделаны оценки влияния на степень предыонизации таких факторов, как геометрия расположения искры предыонизации и старение сопла, что позволило выяснить условия, при которых система предыонизации работает эффективно.

Список литературы

- [1] *Pereira N., Davis J.* // J. Appl. Phys. 1988. Vol. 64. N 3. P. R1-R24.
- [2] *Deeney C. et al.* // Phys. Fluids B. 1993. Vol. 5. N 3. P. 992-1001.
- [3] *Smitt R., Poggett D.* // Appl. Phys. Lett. 1985. Vol. 46. N 12. P. 1129-1131.
- [4] *Baksh R. et al.* // Proc. of 21st IEEE Intern. Conf. on Plasma Sci. Santa Fe, 1994.
- [5] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1967. 692 с.