

### СТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ СИЛЬНОТОЧНЫЙ ТОРОИДАЛЬНЫЙ РАЗРЯД, ПРИВОДЯЩИЙ К ВОЗНИКНОВЕНИЮ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

*Н. Л. Аллен, Т. Е. Аллибон, Д. Р. Чик, Р. Ф. Хеммингс,  
Т. И. Хьюз, С. Кауфман, Б. С. Лайли, Дж. Г. Мэк,  
Х. Т. Майлс, Р. М. Пэйн, Дж. Е. Рид, А. А. Уэйр,  
Дж. А. Уэссон, Р. Ф. Вильямс*

Успешная стабилизация сжимаемого собственным магнитным полем тороидального разряда была впервые осуществлена в Исследовательском центре по атомной энергии (Харуэлл) в установке, известной под названием «Зета»<sup>1</sup>. Для этой цели в камере с металлическими стенками, где происходил газовый разряд, создавалось тороидальное магнитное поле  $B_z$ . Подобный же стабилизированный разряд был получен в нашей лаборатории в меньшей установке, названной «Скептр III».

Разрядная камера установки «Скептр III» представляла собой алюминиевую трубу с внутренним диаметром 30 см, свернутую в виде тора со средним диаметром 115 см. Железный сердечник весом 4 тонны связывал этот тор с первичной обмоткой из восьми витков, намотанной как можно ближе к тору, чтобы свести к минимуму поток рассеяния. Через первичную обмотку с помощью искрового пускателя производилась разрядка батареи конденсаторов емкостью 150 мкф, заряженной до напряжений, достигавших 30 кВ. Продольное магнитное поле в торе доходило до 1000 гаусс.

На рис. 1 показана зависимость максимального тока в газе от магнитного поля, полученная для разрядов в дейтерии при давлении  $3,8 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст. в интервале токов от 20 до 200 кА. Типичные осциллограммы наводимого на окружающем тор витке напряжения  $V$ , тока в газе  $I$  и скорости изменения тока  $\frac{dI}{dt}$  показаны на рис. 2. Резкое изменение  $\frac{dI}{dt}$  в момент  $t'$  происходит при той силе тока, когда вызываемое газоразрядным током магнитное поле у стенок  $B_0$  равняется приложенному извне полю  $B_z$ . Как показывает теория, когда эти поля становятся равными, разряд отрывается от стенок и начинает сжиматься. При этом происходит резкое изменение эффективной индуктивности, так как для

сжатия тока и магнитного потока требуется затрата энергии. Наблюдаемое изменение  $\frac{dI}{dt}$  в этой точке подтверждает выводы теории. Соответствующие изменения  $\frac{dI}{dt}$  при том же значении силы тока наблюдаются также и при уменьшении  $I$ . Это означает, что расширяющийся разряд достигает в этот момент стенок. Измеряя индуктивность при максимальном токе в газе на основе определения отношения  $\frac{dV}{dt} / \frac{d^2I}{dt^2}$ , удалось показать, что от 55 до 90% приложенного извне магнитного потока захватывается сжимающимся разрядом.

Спектроскопические наблюдения указывают на присутствие в разряде значительного количества загрязнений (кислород, углерод, медь и алюминий). Предполагается, что эти загрязнения образуются в результате дуговых разрядов на разьемах, которые должны быть оставлены в металлических стенках тора. Для измерения ионной температуры определялось доплеровское уширение спектральных линий четырехкратно ионизированного кислорода. Для этого использовался кварцевый спектрограф Хильгера. После вычитания аппаратурной ширины (по методу Фойгта) форма спектральных линий совпала с гауссовой вплоть до  $1/20$  максимальной интенсивности. Это и есть предел экспериментальной точности. При давлении  $6 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст., напряжении на конденсаторах 15 кВ и  $B_z = 300$  гаусс ширина линий O V вблизи 2781 Å составляла  $0,97 \pm 0,1$  Å, что соответствует при аппаратурной ширине 0,3 Å температуре  $2,6 \cdot 10^6$  °К. При напряжении на конденсаторах менее 11 кВ измерения температуры не могли быть произведены в связи с недостаточной яркостью спектральных линий загрязнений. Выше этого напряжения температура, как оказалось, несколько убывала с увеличением напряжения. Этот мало обнадеживающий результат объясняется, вероятно, тем, что в связи с увеличением количества загрязнений радиационные и другие потери энергии разряда возрастают быстрее, чем первая степень напряжения (при больших напряжениях чаще возникают дуговые разряды).

Для уменьшения степени загрязнения газа были проведены эксперименты, в которых использовалась первичная обмотка с большим числом витков, и поэтому напряжение на разьемах при той же величине энергии конденсаторной батареи было меньше. Поскольку сопротивление разрядного канала по-прежнему оставалось преимущественно индуктивным, максимальное значение силы тока для заданной энергии конденсаторной батареи при этом уменьшалось лишь очень незначительно. Согласно предварительным измерениям, в случае 16-витковой первичной обмотки были получены ионные температуры в интервале от  $2,5 \cdot 10^6$  до  $3,8 \cdot 10^6$  °К, причем увеличение напряжения конденсаторной батареи вплоть до 25 кВ сопровождалось соответствующим возрастанием температуры. Испускание нейтронов наблюдалось в интервале давлений дейтерия от  $9 \cdot 10^{-4}$  до  $7 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст. и достигало максимума при давлении пример-

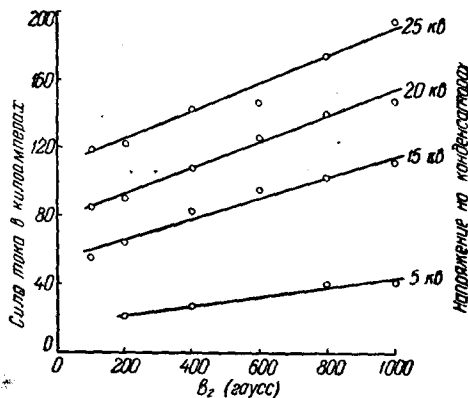


Рис. 1. Зависимость тока от магнитного поля. Дейтерий;  $3,8 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст.

но  $2 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст. и магнитном поле 500 гаусс. Некоторые предварительные результаты относительно полного числа нейтронов в одном импульсе, а в некоторых случаях и соответствующая измеренная на опыте ионная температура приводятся в таблице. Значения температуры,

указанные в 6-м столбце таблицы, вычислены на основе измеренного выхода нейтронов в предположении, что газоразрядный канал, диаметр которого составляет  $\frac{1}{3}$  от внутреннего диаметра сечения тора, имеет всюду одинаковую плотность, а температура остается постоянной в течение 400 мксек.

Благодаря присутствию в разряде загрязнений, он испускает достаточно света для фотографирования. На рис. 3 показана фоторазвертка диаметра светового канала разряда. Разряд фотографировался в одном месте тора одновременно через два щелевых окна, одно из которых было расположено на верхней, а другое на боковой поверхности камеры. На рис. 3, а приведена репродукция с цветной фотографии, на которой одновременно регистрировались красная и голубая области спектра, а на рис. 3, б показана фотография, сделанная через голубой фильтр. Основной канал разряда голубого цвета и имеет резкие края, его диаметр уменьшается с увеличением тока и становится неустойчивым примерно через 300 мксек после начала разряда, когда отношение  $a/b$  достигает величины

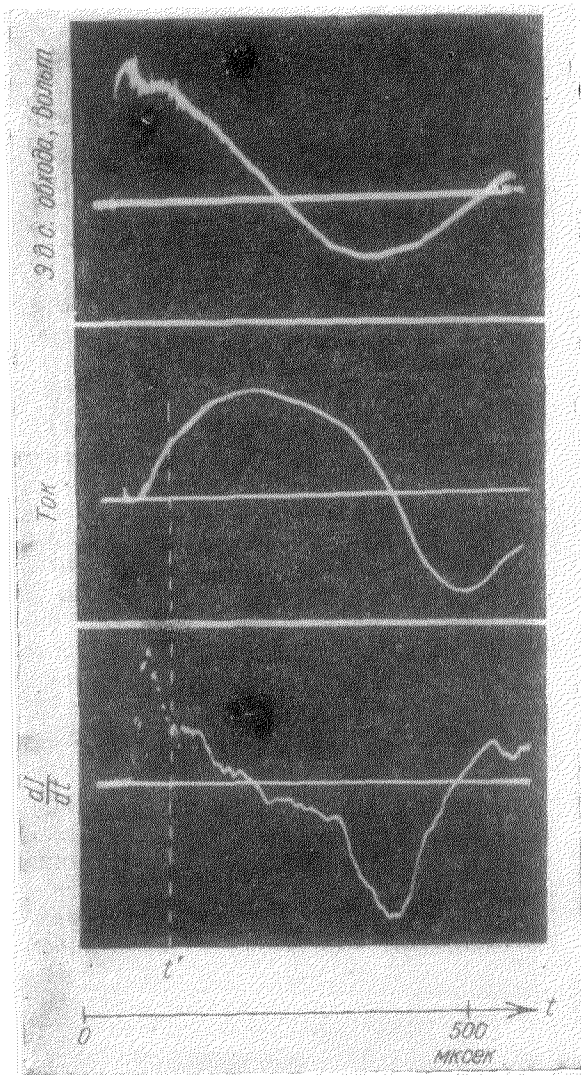


Рис. 2. Дейтерий;  $3,8 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст.; напряжение на конденсаторах 20 кВ; отношение числа витков 8 : 1; магнитное поле 1000 гаусс.

примерно 0,5 ( $a$  — радиус разряда,  $b$  — внутренний радиус сечения тора).

В рассматриваемом случае приложенное извне магнитное поле было слишком мало для обеспечения устойчивости канала разряда в течение всей длительности импульса. На основной канал накладываются светящиеся полосы, простирающиеся по всему сечению камеры. Вначале они имеют в основном красный цвет, а затем становятся белыми. Эти

Давление ( $10^{-3}$ мм рт. ст.)	Напряже- ние на конденса- торах (кв)	Число витков первичной обмотки	$B_z$ (гаусс)	Полный выход нейтронов на им- пульс	Температура, вычисленная по нейтрон- ному выходу ( $10^6$ °K)	Темпера- тура по доплеров- скому уширению ( $10^6$ °K)	Теорети- ческая темпера- тура ( $10^6$ °K)
1,9	15	16	300	$8 \cdot 10^3$	2,7		2,3
1,9	20	16	500	$5 \cdot 10^4$	3,3		2,9
1,9	25	16	500	$10^5$	3,5		3,4
0,9	20	16	200	—		3,2	3,9
3,7	20	16	200	$1,2 \cdot 10^3$	2,0	2,5	2,2
1,2	25	16	300	—	—	3,8	4,1
0,5	11	8	300	—	—	2,6	2,3

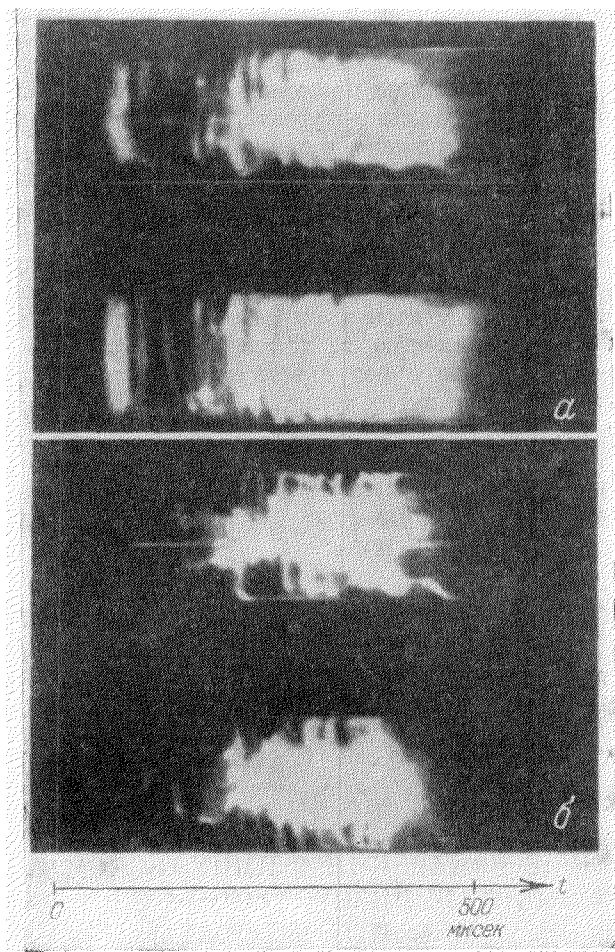


Рис. 3. Развернутая во времени фотография разряда: *a*—без фильтра, *б*—с голубым фильтром. Дейтерий,  $1,2 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.; ток 55 кА; отношение числа витков 8:1; магнитное поле 320 гаусс.

полосы, как было обнаружено, перемещаются вокруг тора со скоростью порядка  $2 \cdot 10^6$  см/сек. Предполагается, что это ударные волны, возбужденные дугowymi разрядами на разъемах камеры.

Полученные результаты согласуются с представлением о том, что разряд стабилизируется благодаря захвату приложенного извне магнитного поля сжимающимся шнуром тока. Условия, необходимые для такой стабилизации, теоретически рассмотрены Шафрановым<sup>2</sup>, Тейлером<sup>3</sup> и Розенблютом<sup>4</sup>. Дальнейшее теоретическое изучение свойств разряда, стабилизированного таким способом, было проведено в нашей лаборатории (неопубликованная работа Лайли). Из теории, в частности, следует, что если тороидальный разряд осуществляется путем пропускания тока разрядки конденсаторной батареи через первичную обмотку, сильно индуктивно связанную с током в газе, то достигаемая в максимуме тока температура почти не зависит от  $a/b$  в интервале  $1 > a/b > 1/3$  и составляет (в градусах Кельвина)

$$T = 3 \cdot 10^7 J^{3/5} / (\gamma p b^4 E_0)^{2/5},$$

где  $J$  — запасенная в конденсаторах энергия в джоулях в расчете на 1 см длины разрядной трубки,  $p$  — первоначальное давление дейтерия в микронах рт. ст.,  $E_0$  — первоначально приложенное электрическое поле в вольтах на см,  $\gamma$  — зависящий от скин-эффекта численный множитель, близкий к единице. При этом  $b$  выражено в сантиметрах.

Этот результат получен в предположении, что газокинетическое давление мало по сравнению с магнитным давлением, радиальная теплопроводность достаточно велика для поддержания одинаковой температуры во всем канале разряда и время обмена энергией между положительными ионами и электронами мало по сравнению с периодом разрядки конденсаторов. При этом учитывается омический нагрев токами, протекающими как по направлению  $z$ , так и по направлению  $\theta$ , а также адиабатическое нагревание в результате сжатия разряда. Что же касается потерь на излучение и других тепловых потерь, то они предполагаются пренебрежимо малыми.

Значения температуры, рассчитанные по вышеуказанной формуле, приводятся в столбце 8 таблицы. С учетом упрощающих предположений, сделанных при выводе формулы, эти значения довольно хорошо согласуются с полученными из опыта.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. P. C. Thonemann и др., см. стр. 175 в этом выпуске УФН.
2. В. Д. Шафранов, J. Nucl. Energy 5, 86 (1957).
3. R. J. Taylor, A.E.R.E. Report T./R. 2262 (1957).
4. M. N. Rosenbluth, Third Congress on Ionization Phenomena in Gases, Venice, 903, 1957.