ПОЛУЧЕНИЕ НЕЙТРОНОВ В МОЩНОМ ИМПУЛЬСНОМ РАЗРЯДЕ

Д. С. Хейгерман и Дж. Мейзер

Проводя опыты с установками, предназначенными для получения энергии ядерного синтеза, ряд авторов [1-5] изучал нейтроны, образующиеся при сжатии разряда в дейтерии. В настоящей работе сообщается об исследовании нейтронов, образующихся в установке «Колумб II» (Лос-Аламосская лаборатория, июль 1957 г.). Ввиду быстрого развития различных видов неустойчивости самосжатого разряда, установка «Колумб II» была задумана как аппарат большой мощности, в котором ток достигал бы максимального значения за возможно более короткое время.

Основная батарея конденсаторов установки «Колумб II», показанная на рис. 1, состоит из 25 малоиндуктивных конденсаторов на напряжение 100 *кв*, по 0,8 *мкф* каждый. Конденсаторы расположены по окружности диаметром 4,2 *м*. Линия передачи, соединяющая их с расположенной

в центре разрядной трубкой, состоит из двух круглых медных листов, разделенных полиэтиленовым изолятором толщиной 1,25 *см*. Эта батарея разряжается через ступенчатый (graded) вакуумный разрядник (Хейгерман, неопубликованная работа), который помещается над разрядной трубкой. Зарядка конденсаторов производится генератором Маркса за 90 *мксек*. Внешняя по отношению к разрядной трубке индуктивность равна 0,035 *мкгенри*, благодаря чему максимальный ток короткого замыкания при 100 *кв* составляет 2,5 миллиона ампер. В типичных условиях

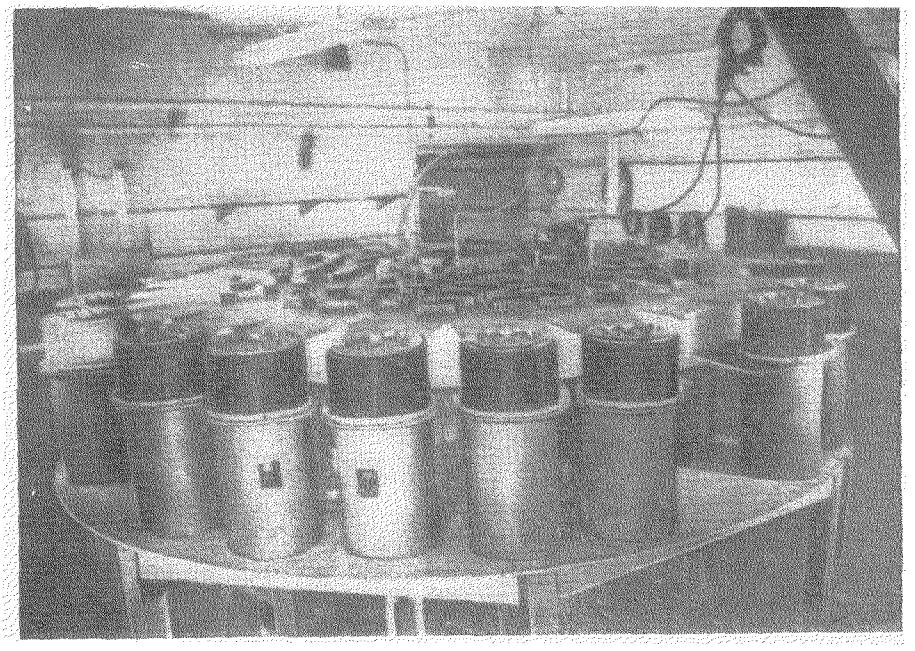

Рис. 1. Общий вид установки.

работы напряжение было 60 *кв*, ток в газе 1 миллион ампер, а время нарастания тока 2 *мксек*. Дополнительно к основной высоковольтной батарее имелась вторая, низковольтная батарея (60 *мкф*, 20 *кв*), которая могла быть использована для предварительного образования в разрядной трубке частично стабилизированного самосжатого разряда перед включением высоковольтной батареи. Идея работы в две стадии заключалась в том, что с помощью батареи большой мощности надеялись адиабатически сжать заранее образованный маломощный самосжатый разряд за пределы области устойчивости и достичь высокой мгновенной температуры. Кроме указанных двух конденсаторных батарей, имелась еще вспомогательная низковольтная батарея, которая позволяла создавать направленное вдоль оси трубки магнитное поле напряженностью до 1000 *гаусс*. Было установлено, что с керамическими разрядными трубками из силиманита (длина 30 *см*, диаметр 10 *см*) вполне можно работать при напряжениях до 55÷60 *кв*. При напряжении свыше 60 *кв* установка до сих пор не могла быть использована из-за следующей своеобразной трудности. Эффект самосжатия разряда можно обнаружить по характерным срывам напряжения или (в случае применения чрезвычайно малоиндуктивных источников питания, подобных рассматриваемому здесь) по срывам тока, которые наблюдаются в определенные моменты разрядного цикла. Оказы-

вается, однако, что эти срывы, а также и нейтроны исчезают при напряжениях свыше 55 *кв*.

а) Отдельное включение только низковольтной батареи (батареи предварительного нагрева). Нейтроны испускались в виде коротких импульсов длительностью 0,1—0,3 *мксек*. По времени появления эти импульсы примерно совпадали с моментами первого и второго сжатия разряда. Максимальный выход нейтронов достигал $2 \cdot 10^7$ на импульс. Выход нейтронов уменьшался в 6 раз при наложении продольного (осевого) магнитного поля напряженностью 23 *гаусс*. Отсюда следует, что эти нейтроны возникали ввиду каких-то неустойчивостей. Один из механизмов образования нейтронов в результате неустойчивостей разряда рассматривается в работе[3].

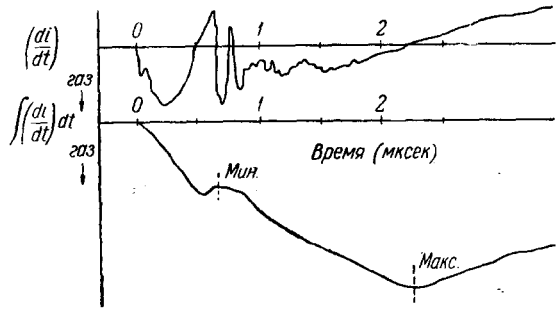

Рис. 2. Ток в газе и $\left(\frac{di}{dt}\right)_{газ}$ в зависимости от времени.

б) Отдельное включение только высоковольтной батареи. На рис. 2 приводятся кривые $\frac{di}{dt}$ и i, полученные при напряжении конденсаторной батареи 50 *кв*. Нейтроны появлялись вскоре после первого сжатия, которое могло быть обнаружено по небольшому провалу на кривой тока. Формы типичных нейтронных импульсов без поля и при включении продольного магнитного поля B_z показаны на рис. 3. При отсутствии поля B_z наблюдался короткий нейтронный всплеск (длительность 0,3 *мксек*) без какого бы то ни было «хвоста» или с очень небольшим остаточным «хвостом». Включение небольшого поля B_z понижало относительную величину первоначального нейтронного всплеска и увеличивало процент нейтронов, приходящихся на «хвост» импульса. Уже при такой сравнительно небольшой напряженности магнитного поля, как 200 *гаусс*, длительность нейтронного импульса достигала 1,5 *мксек*. Величина полного нейтронного выхода была довольно нечувствительна к напряженности продольного магнитного поля. Она уменьшалась только на 55% при изменении поля от 0 до 125 *гаусс*. Максимальный нейтронный выход при нулевом поле B_z составлял $3 \cdot 10^8$ нейтронов. Наблюдалась следующая зависимость величины выхода нейтронов от давления и от добавления примеси гелия: 1) выход прямо пропорционален давлению, увеличиваясь в 2,3 раза при изменении давления от 0,07 до 0,2 *мм* рт. ст., 2) выход снижается в зависимости от относительного содержания примеси гелия f согласно закону $(1-f)^2$. Эти результаты были получены при $B_z = 200$ *гаусс*. На рис. 4 показано

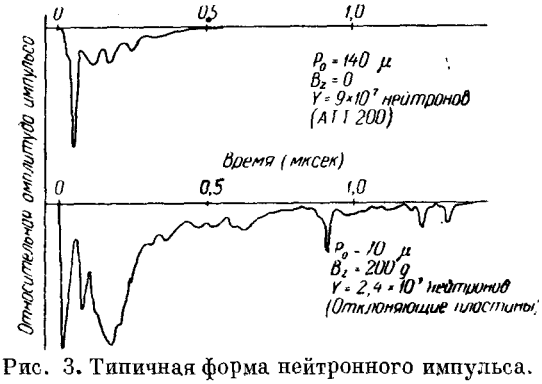

Рис. 3. Типичная форма нейтронного импульса.

энергетическое распределение нейтронов, вылетающих в направлении оси разрядной трубки. Это распределение было получено с помощью ядерных фотопластинок, помещенных позади катода и позади анода трубки. Заметное на рис. 4 относительное смещение максимумов распределений примерно на 0,17 *Мэв* соответствует величине, которая должна была бы наблюдаться при столкновении 20-киловольтного дейтона с покоящимся дейтоном или при движении системы отсчета, связанной с взаимодействующими дейтонами, со скоростью $7 \cdot 10^7$ *см/сек* по направлению к катоду. Фотопластинки экспонировались также по радиальным направлениям в трех местах вдоль разрядной трубки. При этом было обнаружено однородное распределение вылета нейтронов вдоль отрезка от катода до расстояния 5 *см* от анода. На расстояниях меньше 5 *см* от анода выход нейтронов уменьшался. Все фотопластинки экспонировались при поле $B_z = 200$ *гаусс* и напряжении конденсаторной батареи 50 *кв*.

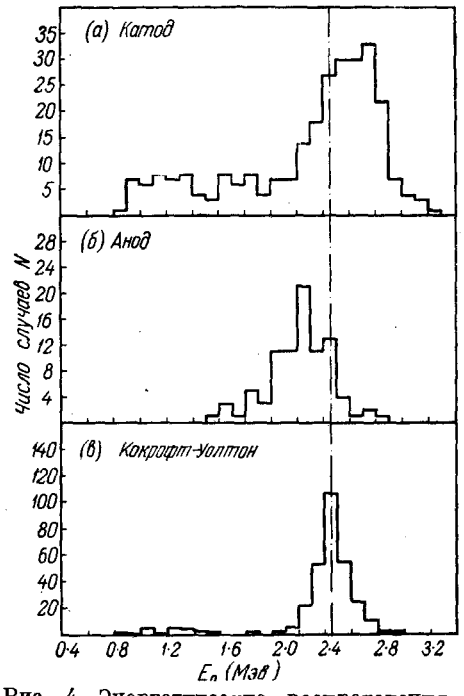

Рис. 4. Энергетические распределения нейтронов, вылетающих в направлении оси трубки в сторону катода (*а*) и в сторону анода (*б*); *в*—калибровочная гистограмма пробег—энергия для D—D-нейтронов, снятая на ускорителе Кокрофта—Уолтона.

в) Совместная работа батарей. Получены следующие предварительные результаты:

1) Было осуществлено последовательное по времени включение батарей. Оказалось, что степень согласования моментов их включения мало влияет на величину нейтронного выхода, если только высоковольтная батарея включается до развития неустойчивостей самосжатого разряда, образованного при разряде низковольтной батареи.

2) Длительность нейтронных импульсов составляла примерно 1 *мксек*.

3) Выход нейтронов был порядка 10^7 на один импульс.

4) Включение продольного магнитного поля напряженностью 90 *гаусс* уменьшало выход нейтронов в 3 раза.

5) Выход нейтронов увеличивался в 2 раза при увеличении напряжения на высоковольтной батарее от 40 до 50 *кв*. В таблице проведено сравнение полученных результатов с результатами других авторов.

Характер зависимости величины выхода нейтронов (см. таблицу, строка «ж») от внешнего магнитного поля, примеси гелия, давления газа и напряжения, а также значительная длительность нейтронных импульсов дают основания предполагать, что образование нейтронов обусловлено причинами, отличными от обычных неустойчивостей. Однако пространственная анизотропия энергетического распределения нейтронов, наблюдаемая при продольном магнитном поле 200 *гаусс*, свидетельствует о том, что движение реагирующих дейтонов является в какой-то степени упорядоченным. Эта анизотропия была меньше той, которая наблюдалась для нейтронов, производимых неустойчивостями разряда при $B_z = 0$ (см. строки «б», «в»), несмотря на то, что электрические поля в установке «Колумб II» имели значительно бо́льшую величину.

Сводка типичных данных по наблюдению нейтронов в прямолинейных самосжимающихся разрядах (пропуски соответствуют неизвестным данным)

	Электрические параметры				Параметры нейтронов								
									Зависимость выхода нейтронов				
	Ссылка	V (*кв*)	I_{max} (*ка*)	Время нарастания (*мксек*)	Длительность импульса (*мксек*)	Порядковый номер сжатия разряда	Макс. выход на импульс	Анизотропия энергии нейтронов (*Мэв*)	от поля B_z	от примесей	от давления D_2	от I или V	Распределение испускания нейтронов
а	1	40	400	8	1,0	2	$4 \cdot 10^7$	—	—	Сильная; исчезают при 0,01% H_2, A, Xe	—	Увеличение в 20 раз от 220 до 450 *ка*	Однородное
б	2	35	~300	2,0	0,3	2,3,4	10^7—10^8	0,3	Сильная; уменьшение в 50 раз при 50 *гс*	Сильная; уменьшение в 50 раз для 8 *мка*	Макс. при 0,2 *мм* рт. ст.	Увеличение в 20 раз от 15 до 30 *кв*	Однородное для аксиальных фотопластинок
в	3	15	250	5,0	0,1	2,3	10^7—10^8	0,26	Сильная; исчезают при 100 *гс*	Сильная; исчезают при 0,2% N_2; уменьшение в 2 раза для 5% He	Макс. при 0,125 *мм* рт. ст.	Увеличение в 50 раз от 14 до 17 *кв*	Линейный рост от анода к катоду
г	4	10	300	5,0	0,5	3	10^5	—	Слабая; уменьшение в 10 раз для 1000 *гс*	Исчезают при 5% N_2	—	—	—
д	5	23	200	6,5	~1,0	1,2,3	—	—	—	—	—	—	—
е	«Колумб II» Только батарея подогрева	15	250	6	~0,1—0,3	1,2	$2 \cdot 10^7$	—	Сильная; уменьшение в 6 раз для 23 *гс*	—	—	—	—
ж	«Колумб II» Только основная батарея	50	800	2,0	~1,5	1	$3 \cdot 10^8$	0,17	Слабая; уменьшение в 2 раза для 125 *гс*	Слабая; уменьшение согласно $(I-f)^2$ для He до 50%	Увеличение в 2,3 раза от 0,07 до 0,2 *мм* рт. ст.	Увеличение в 2 раза от 40 до 50 *кв*	Нелинейное в области 0—5 *см* от анода. Дальше вплоть до катода однородное
з	«Колумб II» Подогревная и основная батареи	50	~800	2,0	~1,0	1	$7 \cdot 10^7$	—	Слабая; уменьшение в 3 раза для 90 *гс*	—	—	—	—

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Арцимович, А. М. Андрианов, О. А. Базилевская, Ю. Г. Прохоров и Н. В. Филиппов, Атомная энергия 3, 76 (1956).
2. D. A. Anderson, W. R. Baver, S. Colgate, F. C. Gilbert, Z. Ise, R. V. Ryle, R. S. White, Доклад на конференции по физике плазмы, Венеция (июнь 1957 г.); перевод см. «Проблемы современной физики», № 1 (1958).
3. R. E. Dunway and J. A. Phillips, LADC, 2943 (будет опубликовано).
4. H. A. B. Bodin and I. A. Reynolds, Engineering 184, № 4781, 538.
5. Berglund, Nillson, Ohlin, Siegbahn, Sundstrom and Swennerstedt, Nuclear Instruments, 1, 233.