

УДК 621.384.663

ВЫВОД МОЩНОГО ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ В АТМОСФЕРУ ЧЕРЕЗ ДВА ПАРАЛЛЕЛЬНО РАСПОЛОЖЕННЫХ ЛИСТА ТИТАНОВОЙ ФОЛЬГИ

Ю. И. Голубенко, Н. К. Куксанов, Р. А. Салимов, П. И. Немытов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск

E-mail: nemytov@inp.nsk.su

Описана применяемая в промышленных ускорителях ЭЛВ-6, ЭЛВ-12 система вывода пучка электронов в атмосферу через два параллельно расположенных листа титановой фольги.

Ключевые слова: ускоритель электронов, выпускное устройство, магнитное поле.

Применение радиационных технологий в крупномасштабных промышленных производствах (очистка отходящих газов, образующихся при работе ТЭЦ или при производстве и обработке металлов; очистка сточных вод и др.) требует увеличения мощности промышленных ускорителей электронов до нескольких сотен киловатт.

При использовании большинства радиационно-лучевых технологий продукция обрабатывается пучком электронов непосредственно в атмосфере. Наиболее распространенным методом является вывод пучка в атмосферу через тонкую вакуумно-плотную фольгу. Наиболее часто используется титановая фольга толщиной 30–50 мкм. Сила тока, проходящего через единицу площади фольги, определяется потерями в фольге и условиями охлаждения. Для того чтобы увеличить силу выпускного тока, требуется увеличить площадь листа фольги, поэтому необходимо либо увеличивать длину листа фольги, либо размещать два листа фольги параллельно, с последовательным сканированием пучка по каждому из них.

Оптимальная энергия пучка электронов, как правило, составляет $0,7 \div 1,5$ МэВ, поэтому для достижения необходимой мощности требуется выводить в атмосферу пучки электронов с силой тока, равной нескольким сотням миллиампер. Максимальное среднее значение плотности тока пучка, обеспечивающее длительную безаварийную работу выпускного устройства при выводе пучка через окно из титановой фольги толщиной 50 мкм, составляет примерно 100 мкА/см^2 . Максимальное значение выпускаемого тока ограничено нагревом фольги, обусловленным потерями энергии в ней, и условиями ее охлаждения [1]. Ширина окна выпускного устройства ограничена механической прочностью фольги. Давление атмосферного воздуха создает нагрузку на фольгу, величина которой не должна превышать предела прочности фольги при заданных температуре и радиусе изгиба фольги. В линейных высоковольтных ускорителях электронов (ускорителях ЭЛВ) ширина выпускного окна принята равной 70 мм, т. е. близка к оптимальной. Окна приблизительно такой ширины используются всеми основными производителями промышленных ускорителей электронов как в России, так и за рубежом. Таким образом, при силе выпущенного тока 100 мА (что соответствует 100 кВт в пучке при энергии 1 МэВ) длина окна должна составлять 150 см. В серийных ускорителях ЭЛВ мощностью до 100 кВт используются выпускные окна такой длины и такая максимальная сила тока пучка.

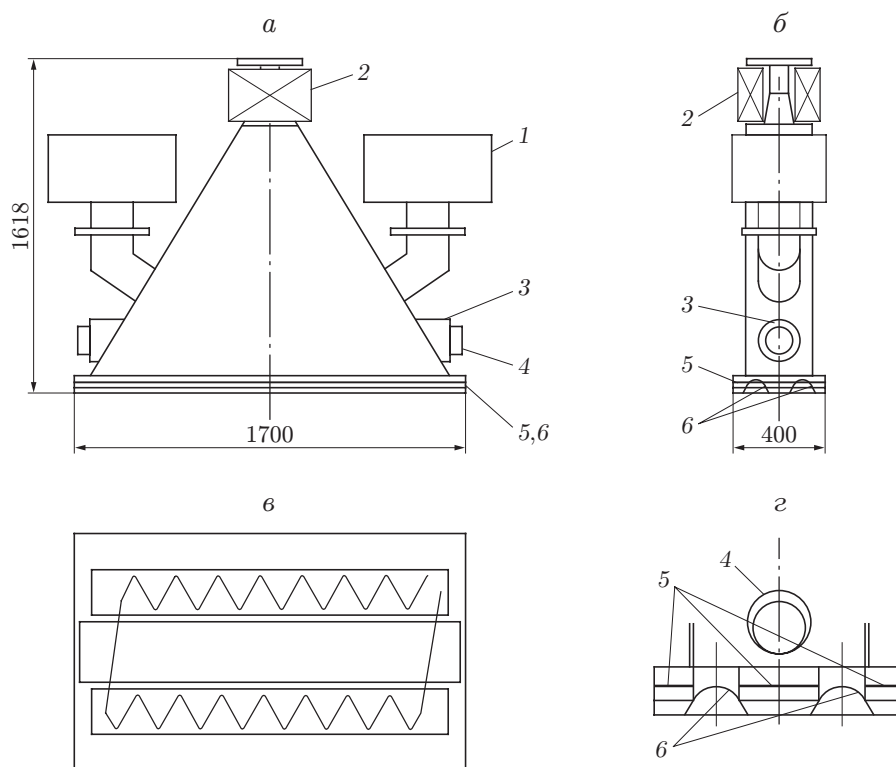


Рис. 1. Схема двухоконного выпускного устройства:

а — вид спереди; *б* — вид сбоку; *в* — листы фольги с траекторией движения пучка по ним; *г* — водоохлаждаемый цилиндр; 1 — магниторазрядные насосы, 2 — катушки и сердечники системы развертки и переброса пучка, 3 — фланец защитного цилиндра, 4 — водоохлаждаемый цилиндр, 5 — рамка крепления листов фольги, 6 — листы фольги

Для увеличения мощности ускорителя в несколько раз требуется пропорциональное увеличение силы тока пучка, а следовательно, и площади листа фольги. Однако увеличение длины листа фольги приводит к увеличению габаритных размеров выпускного устройства, а следовательно, всего ускорителя. Кроме того, увеличение длины выпускного окна существенно усложняет конструкцию и увеличивает массу выпускного устройства.

Для устранения указанных недостатков разработано двухоконное выпускное устройство, в котором два листа фольги расположены параллельно (рис. 1) [2]. Применение двух листов фольги позволило увеличить площадь выпускного окна в два раза без существенного изменения габаритов всего устройства.

На рис. 1, *в* показана траектория движения пучка электронов на листах фольги. Видно, что пучок пробегает по одному листу фольги и вблизи торца выпускного устройства перемещается на второй лист. Таким образом, момент переброса пучка необходимо синхронизировать с фазой тока, в продольной развертке имеющего пилообразную траекторию. Сканирование по каждому листу фольги осуществляется стандартными для ускорителей ЭЛВ отклоняющими системами. Для обеспечения поочередного движения пучка по каждому листу фольги необходимо к полю, создаваемому отклоняющими электромагнитами для поперечного сканирования пучка, добавить знакопеременное поле, постоянное в течение полупериода сканирования вдоль окна и создаваемое дополнительным переключающим электромагнитом.

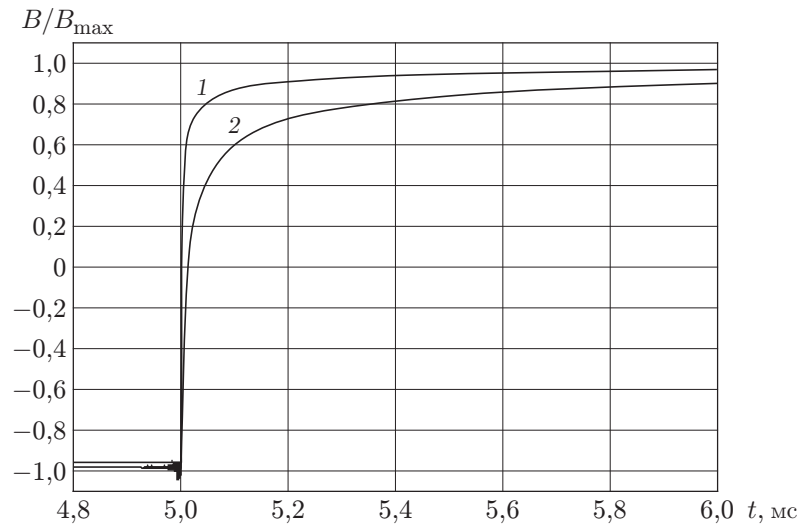


Рис. 2. Зависимость от времени напряженности магнитного поля внутри выпускного устройства со стенками из нержавеющей стали толщиной 1 мм (1) и 3 мм (2)

Для защиты элементов крепления листов фольги и ее уплотнений от попадания прямого пучка в моменты его переброса установлен водоохлаждаемый цилиндр (см. рис. 1, *з*), одновременно являющийся элементом жесткости конструкции. Охлаждение фольги выпускного окна производится сжатым воздухом, для каждого окна используется отдельный высоконапорный вентилятор.

Основным критерием оценки эффективности работы системы переброса пучка является время его прохождения по внутренней мишени (цилиндру), так как это время определяет потери мощности пучка при перебросе. Целесообразно, чтобы эти потери не превышали ионизационных (неизбежных) потерь мощности, которые для указанных значений энергии при прохождении пучка через фольгу равны произведению напряжения $U \approx 35$ кВ на силу тока пучка. Следовательно, при силе тока пучка, равной 200 мА, тепловая нагрузка фольги составит 7 кВт.

Переключающий магнит установлен вне вакуумной камеры, выполненной из нержавеющей стали. Таким образом, время переброса пучка зависит от толщины стенок выпускного устройства (времени проникновения поля внутрь вакуумной камеры), причем это время зависит от длительности фронта при изменении полярности тока в катушках переключающего магнита.

На рис. 2 представлены результаты компьютерного моделирования поля внутри вакуумной камеры. Расчет времени нарастания напряженности поля проводился в предположении, что вне вакуумной камеры поле мгновенно меняет направление на противоположное. Результаты расчета показывают, что при напряженности поля, равной 0,9 Тл, и толщине стенок вакуумной камеры в месте установки переключающего магнита, равной 1 мм, длительность фронта переполюсовки поля внутри вакуумной камеры составляет приблизительно $0,15 \div 0,20$ мс.

Приведем параметры переключающего магнита, обмотки которого расположены на сердечнике. Для уменьшения потерь на перемагничивание сердечника магнит выполнен из феррита и имеет сечение 25×25 мм, обмотка содержит 2×50 витков. Индуктивность обмотки L приближенно равна 0,5 мГн, при энергии 1 МэВ требуемая амплитуда тока переброса через обмотку составляет 7 А. Активное сопротивление обмоток и соединительных

проводов R приближенно равно 1 Ом. Это означает, что время переполюсовки тока будет определяться постоянной времени этой цепи ($L/R = 0,5$ мс). Для уменьшения длительности фронта необходимо в момент изменения полярности тока в обмотке приложить к ней напряжение, значительно превышающее рабочее. Не останавливаясь на деталях технической реализации, заметим, что если установившееся напряжение на обмотке близко к значению 10 В, то в момент перемагничивания сердечника напряжение имеет противоположный знак и приблизительно равно 300 В. Это позволяет сократить длительность фронта переключения направления тока в обмотке примерно до 0,1 мс.

Скорость изменения напряженности поля переключающего магнита внутри вакуумной камеры определялась экспериментально. Для этого внутрь вакуумной камеры помещалась измерительная катушка, напряжение на которой пропорционально скорости изменения напряженности поля dB/dt . Измерения показывают, что время переброса пучка, определяемое влиянием стенок вакуумной камеры и источником питания, не превышает 0,25 мс.

Учитывая, что время прохождения пучка по листу фольги, определяемое частотой сканирования пучка в направлении вдоль этого листа, составляет 10 мс, потери мощности в пучке составят $P = 0,25/10$, или 2,5 %.

Описанный способ вывода пучка электронов впервые применен авторами данной работы в ускорителе ЭЛВ-6 и при создании ускорителя ЭЛВ-12 с мощностью до 500 кВт и силой тока пучка до 500 мА. Ускоритель ЭЛВ-12 успешно эксплуатируется в Республике Корея при очистке сточных вод красильного производства. Подобные способы вывода пучка электронов используются и другими компаниями, производящими промышленные ускорители.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Куксанов Н. К., Салимов Р. А., Черепков В. Г.** Выпуск в атмосферу развернутого электронного пучка с током до 100 мА // Приборы и техника эксперимента. 1988. № 4. С. 20–22.
2. **Fadeev S. N., Golubenko Yu. I., Kuksanov N. K., et al.** Accelerator ELV-12 and its applications in environment protection technologies // Probl. Atom. Sci. Technol. Ser. Nucl. Phys. Investigat. 2004. N 1. P. 178–180.

Поступила в редакцию 30/III 2009 г.
