

**ПОДАВЛЕНИЕ РАДИАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ ИОНОВ НА 2 МэВ**

**И. Г. Игнатъев, В. И. Мирошниченко, А. М. Сиренко, В. Е. Сторижко**

*Институт прикладной физики НАН Украины, Сумы*

Представлены результаты экспериментального исследования радиационного излучения электростатического ускорителя «Сокол» на энергию 2 МэВ для ядерного микроанализа. Разработана и исследована система радиационной защиты ускорителя. Система защиты уменьшает мощность дозы излучения на два порядка.

**Введение**

Одна из важнейших причин, которые затрудняют широкое применение малогабаритных ускорителей ионов малых и средних энергий в индустрии микро- и нанотехнологий, – проблема радиационной безопасности.

Известно, что ускорители пучков ионов прямого действия мэВных энергий являются источниками мощного радиационного излучения, которое создается электронными лавинами в ускоряющих трубках [1, 2].

Электронные лавины возникают в результате ионно-электронных взаимодействий пучка ионов и электронов с элементами высоковольтной структуры ускоряющих трубок (электродами, изоляторами) и с частицами остаточного газа. Генерируется в основном рентгеновское излучение, жесткая часть которого (соответствующая энергии электронов свыше 100 кэВ) проходит через металлические стенки бака ускорителя.

Если не принимаются специальные меры защиты, мощность поглощенной дозы радиационного излучения в рабочей зоне ускорителя превышает десятки микрорентген в секунду, что затрудняет работу персонала, приводит к выходу из строя оборудования и элементов установки, а также снижает предельное напряжение. Возможны два пути уменьшения радиационного излучения:

ослабление излучения вне ускорителя при помощи защитных сооружений (выполненных из железобетона или металла) [3]. Способ отличается высокой стоимостью и трудоемкостью строительных работ и неприемлем для малогабаритных ускорителей ионов;

подавление источника излучения (в данном случае - электронных лавин ускорительных трубок).

В данной работе разработана и экспериментально исследована система подавления радиационного излучения малогабаритного электростатического ускорителя (ЭСУ) «Сокол» [6], входящего в состав ускорительно-аналитического комплекса Института прикладной физики НАН Украины (г. Сумы).

**Исследование рентгеновского излучения  
ЭСУ «Сокол»**

ЭСУ «Сокол» является малогабаритным ускорителем на энергию ионов  $H^+$  2 МэВ и током пучка до 50 мкА [4].

Измерения мощности дозы излучения проводились в точках (4) на поверхности бака (высоковольтного сосуда) (рис. 1), для чего использовался дозиметр ДРГЗ-02. Точки измерения располагаются напротив оси ускоряющей трубки. Ток пучка составлял 20 мкА в диапазоне энергии ионов  $H^+$  600 - 1400 кэВ, давление остаточного газа в ускоряющей трубке не более  $10^{-4}$  Па.

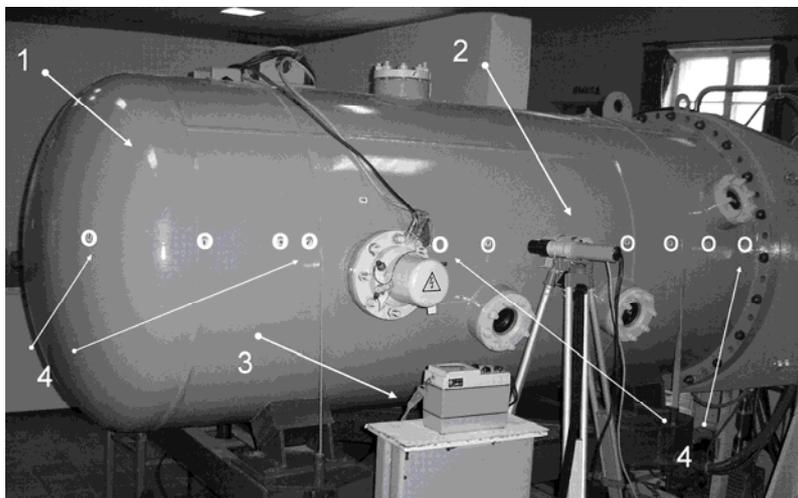


Рис. 1. Измерение мощности дозы рентгеновского излучения на поверхности бака ЭСУ «Сокол»: 1 – бак; 2 – измерительный блок; 3 – дозиметр ДРГЗ-02; 4 – точки измерения на баке.

На рис. 2, *a* представлены результаты эксперимента. Во всем диапазоне энергий распределения мощности дозы  $P(z)$  имеют характерные максимумы, расположенные в начале кондуктора, где максимальна концентрация лавин электронов и их энергия, а также давление остаточного газа. В районе максимумов мощность дозы превышает естественный природный фон (12 мкР/ч) более чем на три порядка.

В результате экспериментов было обнаружено, что  $P(z)$  возрастает пропорционально току пучка и при его расфокусировке – режиме, при котором ионы активно взаимодействуют с электродами, уровень радиации не изменяется (в пределах точности определения  $P(z)$ ). Это позволяет сделать вывод о том, что для развития лавин основное значение имеет процесс взаимодействия ионов пучка с остаточным газом.

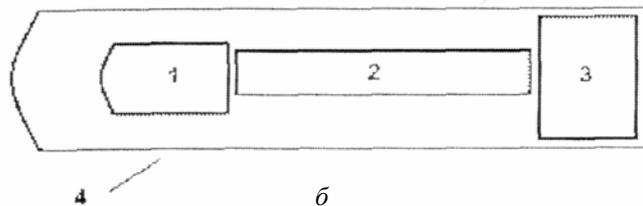
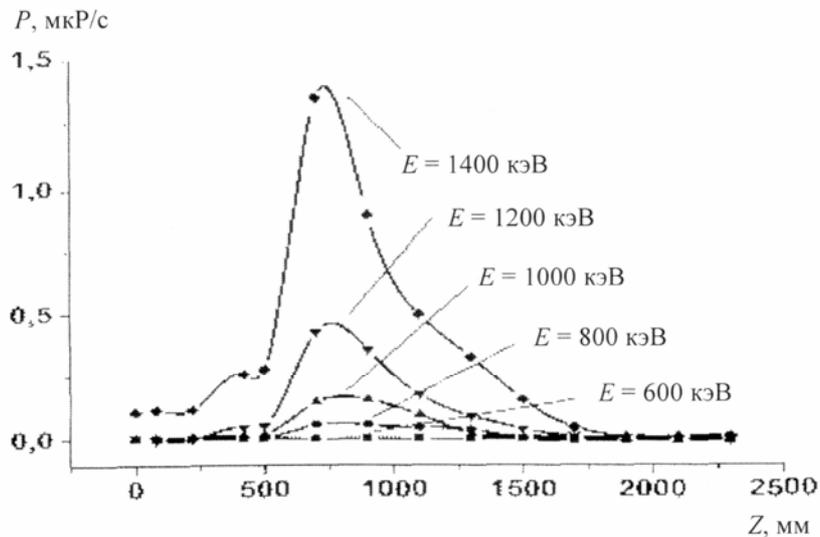
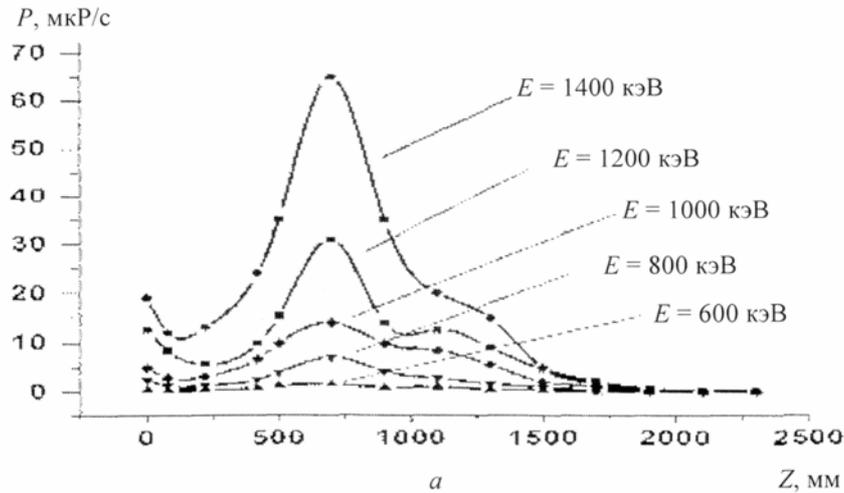


Рис. 2. Распределение мощности дозы радиационного излучения ЭСУ «Сокол» по поверхности бака без магнитной системы подавления излучения (*a*) и с магнитной системой (*б*): 1 – кондуктор; 2 – ускоряющая трубка; 3 – электромеханический блок; 4 – бак.

### Магнитная система подавления радиационного излучения ускоряющей трубки ЭСУ «Сокол»

Задача подавления радиационного излучения ускоряющей трубки может быть наиболее просто решена путем отклонения на электроды ускоряющей трубки инициирующих лавины электронов, энергия которых невелика ( $\sim 1$  эВ) [5]. На практике для воздействия на электронные лавины применяют или электроды специальной формы, или магнитные поля [1].

Для уменьшения рентгеновского излучения ускоряющей трубки ЭСУ «Сокол» применялась магнитная система (рис. 3), состоящая из 19 пар постоянных магнитов, выполненных из соединения Nd-Fe-B (неодим - железо - бор) производства ООО НПФ «Полюс-Н» (Харьков, Украина).

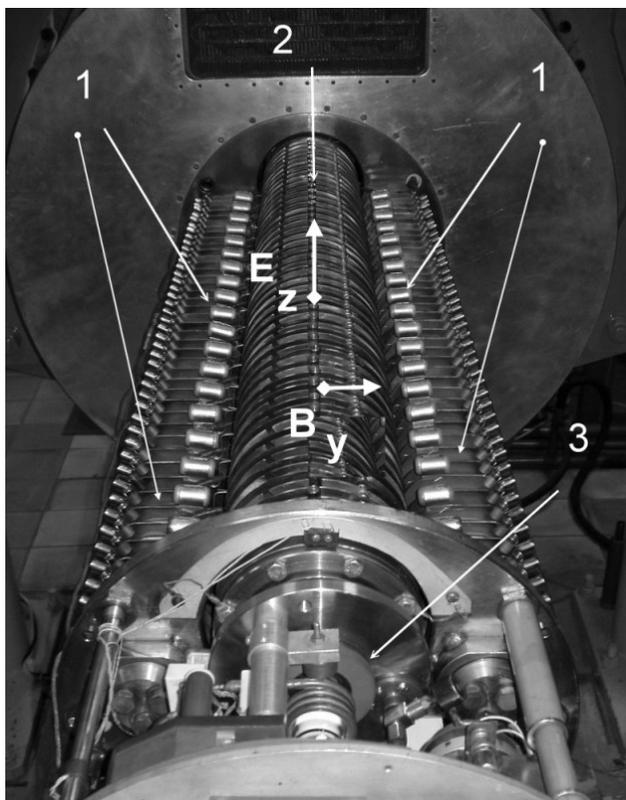


Рис. 3. Расположение магнитов системы подавления радиации ускоряющей трубки: 1 – магниты; 2 – ускоряющая трубка; 3 – ионный источник.

Магниты расположены вдоль ускоряющей трубки так, что создают магнитное поле, перпендикулярное ее оси (см. рис. 3). Измерения распределения магнитного поля, выполненные при помощи гаусс-тесламетра FH-54 показали, что

максимальное значение индукции магнитного поля на оси ускоряющей трубки составляет 5 мТл.

Таким образом, заряженные частицы движутся в скрещенных электростатическом  $E_z$  и магнитном  $B_y$  полях. Положительно заряженные ионы движутся от источника ионов в направлении  $E_z$ , а электроны - в противоположном направлении.

Согласно численным расчетам [2], отклонение ионов  $H^+$  от оси ускоряющей трубки на выходе из нее не превышает долей миллиметра при энергии 0,6 - 2 МэВ, что не нарушает нормального режима работы установки. В то же время радиус кривизны траекторий электронов при энергии 1 эВ сравним с радиусом апертуры ускоряющей трубки (15 мм), что приводит к осаждению электронов на ее стенки и их выбыванию из процесса лавинообразования.

На рис. 2, б представлены распределения мощности дозы по длине бака ускорителя при применении системы магнитной защиты. Как следует из рис. 2, предлагаемая система позволяет уменьшить уровень радиации на два порядка.

### Выводы

1. Экспериментальное исследование радиационной обстановки ЭСУ «Сокол» показало, что в рабочей зоне установки мощность поглощенной дозы рентгеновского излучения превышает естественный природный фон более чем на два-три порядка.

2. Применение магнитной системы подавления радиационного излучения позволило уменьшить мощность дозы излучения на два порядка, что существенно повышает уровень радиационной безопасности установки.

3. Опыт годовой эксплуатации показал высокую надежность системы. Доза облучения персонала категории «А», работающего на установке, уменьшилась в среднем в 5 - 10 раз при одновременном снятии ограничений на, по крайней мере, кратковременный доступ ко всем узлам установки. В области каналов ускорителя (рабочих мест персонала категорий «В», «С») радиационная обстановка в пределах естественного фона.

4. Время кондиционирования (тренировки ускорителя для достижения необходимой энергии ионов) уменьшилось в несколько раз, что позволило улучшить эксплуатационные характеристики установки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Joy T. Electrostatic accelerator tubes – recent progress and future directions // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. - 1990. - Vol. 287. - P. 48 - 63.
2. *Игнат'єв І.Г., Мирошніченко, В.І. Сіренко А.М., Сторіжко В.Е.* Исследование радиационного излучения электростатического ускорителя «Сокол» ИПФ НАН Украины // Тез. докл. VI конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям. - Харьков, 2008. - С. 117.
3. *Гетманов В.В.* Критерий оптимизации защитных сооружений // ВАНТ. Сер. Проектирование и строительство. - 1990. - Вып. 3. - С. 35 - 37.
4. *Батвинов Л.П., Вергунов А.Д., Глазунов Л.С. и др.* Малогабаритный электростатический ускоритель на 2 МэВ горизонтального типа (предварительные испытания) // ВАНТ. Сер. Техника физического эксперимента. - 1985. - Вып. 1(22). - С. 26 - 28.
5. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. - М.: Наука, 1992. - 536 с.

**ЗМЕНШЕННЯ РАДІАЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ  
ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ІОНІВ НА 2 МеВ**

**І. Г. Ігнат'єв, В. І. Мирошніченко, А. М. Сіренко, В. Ю. Сторіжко**

Наведено результати експериментального дослідження радіаційного випромінювання електростатичного прискорювача «Сокол» на енергію 2 МеВ для ядерного мікроаналізу. Розроблено та досліджено систему радіаційного захисту прискорювача «Сокол». Система зменшує потужність дози випромінювання на два порядки.

**SUPPRESSION OF X-RADIATION FROM 2 MeV ION ELECTROSTATIC ACCELERATOR**

**I. G. Ignat'ev, V. I. Miroshnichenko, A. M. Sirenko, V. E. Storizhko**

The paper presents results concerning studies of X-radiation from 2 MeV ion electrostatic accelerator “Sokol” used for nuclear microprobe analysis. The radiation protection system of the accelerator was developed and tested. Tests of the system of the accelerator show that it reduces doses rate by two orders of magnitude.

Поступила в редакцію 12.08.08,  
после доработки – 10.12.08.