

ПРОЕКТ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ КОЛЛАЙДЕРА NICA

*Е. В. Ахманова^а, А. В. Иванов^б, А. Г. Кобец^{а, в}, М. П. Кокуркин^з,
Н. Ю. Лысов^з, И. Н. Мешков^а, М. М. Пашин^з, Р. В. Пивин^а,
А. Ю. Рудаков^а, А. В. Смирнов^а, Н. Д. Топилин^а, Ю. А. Туманова^а,
А. А. Филиппов^з, А. В. Шабунов^а, С. Л. Яковенко^а*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера, Новосибирск, Россия

^в Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины, Харьков, Украина

^з Всероссийский электротехнический институт, Москва

В ОИЯИ ведется разработка высоковольтной системы электронного охлаждения (СЭО) коллайдера NICA на энергию электронов до 2,5 МэВ. СЭО разрабатывается в соответствии с существующей мировой практикой, принятой при создании подобных устройств. Отличительной особенностью данной конструкции является использование двух охлаждающих электронных пучков (по одному пучку на кольцо), ускорение и замедление электронов осуществляется общим высоковольтным генератором. Разработан концептуальный проект высоковольтной СЭО. Она состоит из трех сосудов, заполненных элегазом под давлением. В двух из них размещены по две электронные пушки и по два коллектора электронов и ускоряющие/замедляющие трубки, погруженные в продольное магнитное поле, создаваемое системой соленоидов. В третьем сосуде расположен высоковольтный генератор, в основу конструкции которого положена схема умножения напряжения.

The electron cooling system at electron energy up to 2.5 MeV for the NICA collider is under design at JINR. The electron cooler is developed according to the available world experience of similar systems manufacturing. The main peculiarity of the electron cooler for the NICA collider is using of two cooling electron beams (one electron beam per each ring of the collider) that never has been done before. The acceleration and deceleration of the electrons is produced by common high-voltage generator. The conceptual design of the electron cooling system has been developed. The cooler consists of three tanks. Two of them contain electron beam formation system including electrostatic tubes, the electron gun and electron collector immersed in magnetic field of the solenoids. The third tank contains HV generator with design based on voltage multiplying scheme.

PACS: 29.20.-c

ВВЕДЕНИЕ

В Объединенном институте ядерных исследований (Дубна) совместно с Всероссийским электротехническим институтом (Москва) начата разработка высоковольтной системы электронного охлаждения (СЭО) для коллайдера NICA [1]. Разработан концептуальный проект СЭО. Элементы высоковольтного блока размещаются в герметичных металлических сосудах (рис. 1), заполняемых газом SF₆ (элегаз) под давлением до 8 атм.

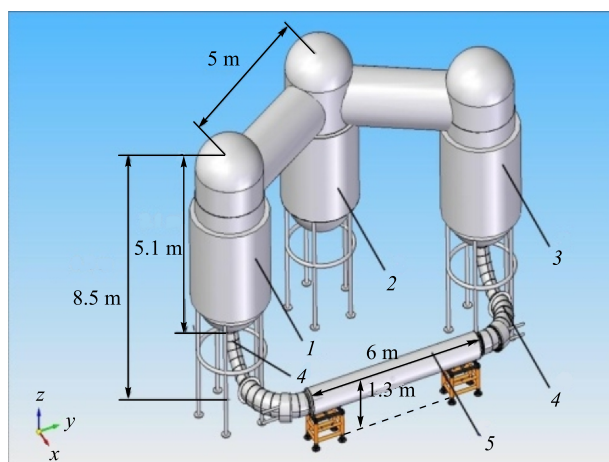


Рис. 1. Общий вид высоковольтной СЭО. 1, 3 — сосуды, содержащие электронную пушку, электростатические ускорительные и замедляющие трубки и коллектор для электронного пучка противоположного направления; 2 — сосуд высоковольтного генератора; 4 — соленоиды транспортировки электронных пучков; 5 — секция электронного охлаждения

Параметры кулера

Энергия электронов, МэВ	0,5–2,5
Ток электронного пучка, А	0,1–1,0
Ток потерь электронного пучка, мА	1
Выделяемая мощность от накала катодов, Вт	2×100
Максимальная мощность, выделяемая в коллекторах, кВт	2×3
Диаметр электронного пучка, см	1,0
Продольное магнитное поле, кГс	1,0–2,0
Стабильность энергии электронного пучка	$1 \cdot 10^{-4}$

Система транспортировки электронного пучка включает в себя секции тороидальных и прямолинейных соленоидов. Основные параметры СЭО приведены в таблице.

1. ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА И РЕКУПЕРАЦИЯ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ

Системы ускорения и замедления электронного пучка состоят из трех основных подсистем (рис. 2): ускорительной вакуумной трубки с электронной пушкой для ускоряющей системы или коллектором, присоединенным к верхней части замедляющей трубки; сосуда под высоким давлением; соленоида, формирующего продольное магнитное поле.

Конструкция электронной пушки (рис. 3, а) имеет три основных элемента: катод с электродом Пирса, управляющий электрод и анод, соединенный с верхним фланцем ускорительной трубки. Коллектор электронов (рис. 3, б) состоит также из трех элементов:

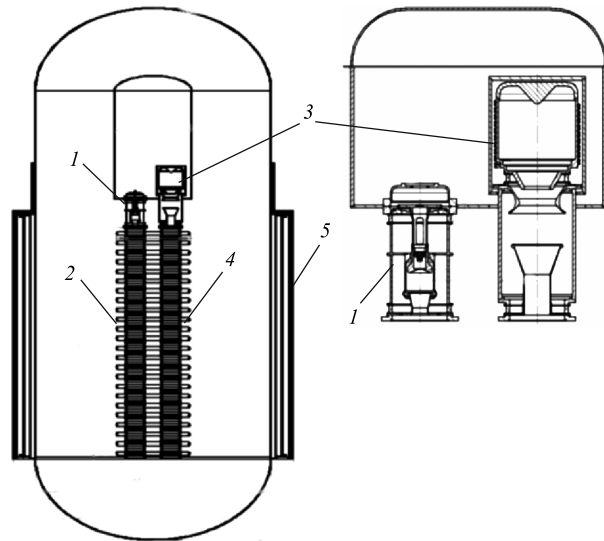


Рис. 2. Системы ускорения и замедления для двух электронных пучков противоположного направления: 1 — электронная пушка первого пучка; 2 — его ускорительная трубка; 3 — коллектор электронов второго пучка; 4 — его замедляющая трубка; 5 — соленоид

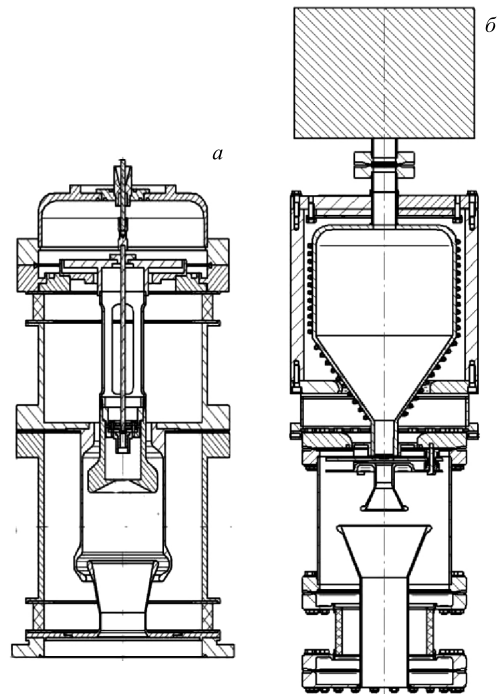


Рис. 3. Конструкция электронной пушки (а) и коллектора электронов (б)

коллекторного анода, соединенного с верхним фланцем замедляющей трубки, супрессорного электрода и коллектора электронов, охлаждаемого водой, циркулирующей под высоким потенциалом.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Формирование магнитного поля в области пушки и коллектора осуществляется с помощью магнитного экрана (рис. 4), позволяющего обеспечить существенную однородность магнитного поля в области пушки и хорошо экранировать коллектор. С помощью численного моделирования магнитного поля в области катода и коллектора найдена оптимальная конфигурация магнитного экрана. Стандартный катод диаметром 13 мм расположен на 0,3 м ниже плоскости экрана, в области однородного магнитного поля (рис. 5).

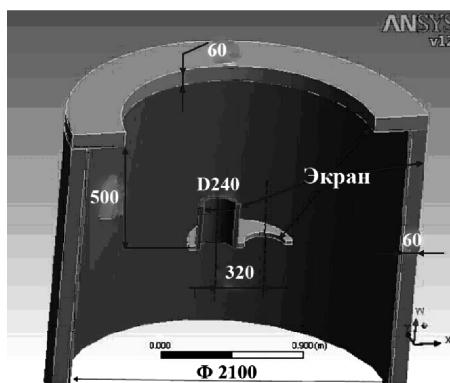


Рис. 4. Оптимальная конфигурация магнитного экрана (срез по плоскости осей обоих пучков)

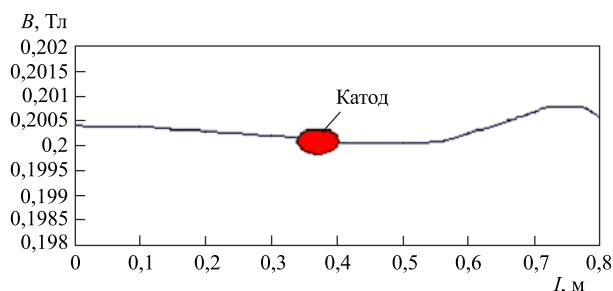


Рис. 5. Распределение магнитного поля в области катода для магнитного экрана, представленного на рис. 4

Численное моделирование электрического поля (рис. 6) вдоль оси соленоида и динамики электронного пучка из пушки позволило получить распределение поперечной температуры вдоль траектории электронов, эмитируемых с катода на радиусе 0,65 см (рис. 7). Температура электронов на выходе пушки в поле 2 кГц менее 0,1 эВ.

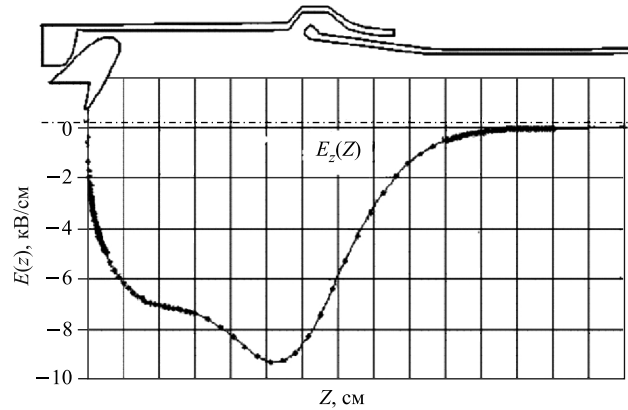


Рис. 6. Распределение электрического поля вдоль оси соленоида: $U_{\text{катод}} = -60$ кВ, $U_{\text{контр}} = -41$ кВ, $U_{\text{анод}} = 0$ кВ, $I = 1$ А, $\mu P = 0,38$

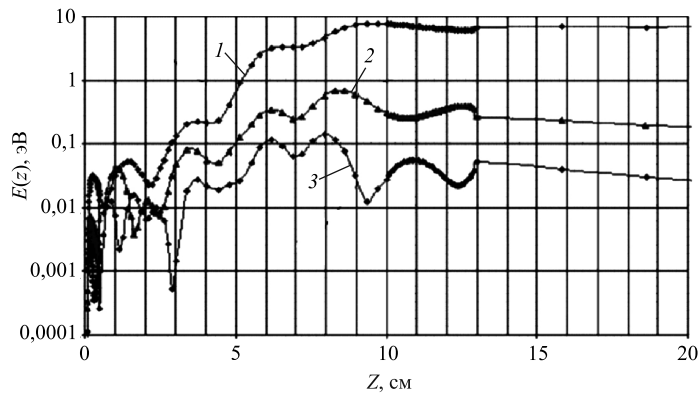


Рис. 7. Распределение поперечной температуры электронов, эмитируемых с катода на радиусе $r = 0,65$ см, вдоль траектории; $B = 1$ (1), 1,5 (2), 2 (3) кГс

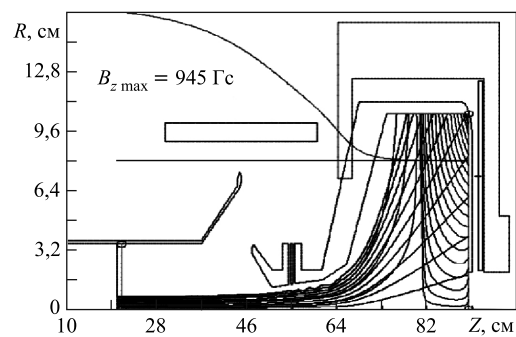


Рис. 8. Линии магнитного поля в коллекторе (постоянный магнит с магнитным полем противоположного направления, установленный на задней стенке коллектора): $I = 1$ А, $U_{\text{катод-коллектор}} = 2$ кВ, $\mu P = 11,26$

Для увеличения эффективности коллектора был введен постоянный магнит, создающий магнитное поле, противоположное направлению основного потока. В результате линии магнитного поля формируют в коллекторе магнитную ловушку для отраженных электронов, повышая эффективность коллектора (рис. 8). Моделирование движения электронов в коллекторе выполнено с помощью программы SAM [2].

3. ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ГЕНЕРАТОР

В основу конструкции высоковольтного генератора (рис. 9) положена схема умножения напряжения. Выбранная схема имеет три диодные колонны и 12 секций умножения. При рабочей частоте 20 кГц общее количество диодов (тип С2-29В-2) — 2500, общее количество емкостей (тип С2-29В-2) — 8316. Трехфазное сетевое напряжение 380 В через регулировочный автотрансформатор АТ поступает на трехфазный выпрямитель V. Сглаженное фильтром постоянное напряжение подается на мостовой инвертор F, преобразующий его в меандр частотой 2 кГц. Это напряжение через резонансный дроссель DR поступает на высоковольтный трансформатор НТ с двумя симметричными высоковольтными обмотками и далее на вход симметричного каскадного генератора постоянного тока КГПТ, на выходе которого напряжение достигает 2,5 МВ.

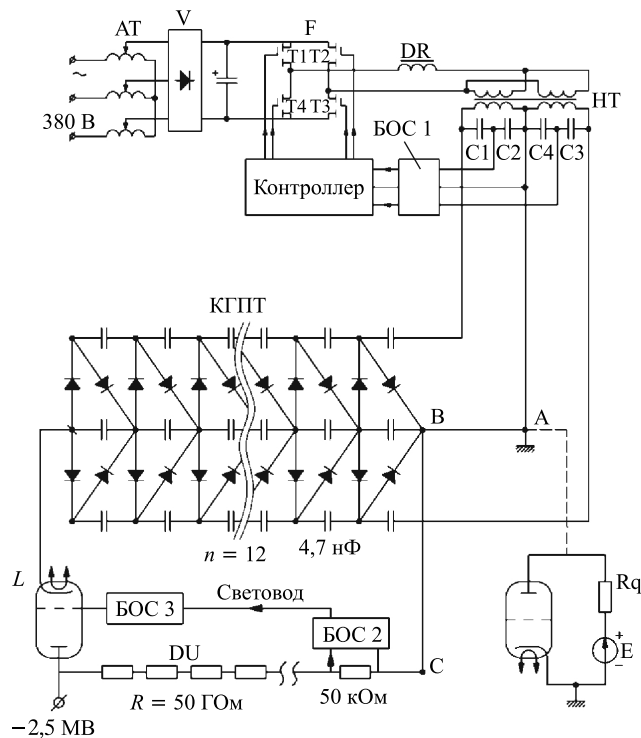


Рис. 9. Электрическая схема высоковольтного генератора

Для сглаживания пульсаций высокого напряжения используется маломощный высоковольтный триод L на входе каскадного генератора, выполняющий роль регулируемого высокоомного сопротивления, величина которого регулируется напряжением с прецизионного делителя напряжения DU по цепи блоков обратной связи БОС 2 — световод БОС 3.

Принципиально регулирующая лампа может быть установлена и на потенциале земли. В этом случае она присоединяется к точке А. Заземление в точке А ликвидируется и переносится в точку С; ликвидируется и связь между точками В и С. В этом варианте возрастает эффективное значение емкости, которую должна заряжать/разряжать лампа. Правда, этот недостаток компенсируется преимуществом, которое дает размещение лампы на потенциале земли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан концептуальный проект высоковольтной СЭО. Выбрана схема высоковольтного генератора, и создан его прототип на 250 кВ. Проведено численное моделирование магнитных и электрических полей в области формирования электронного пучка и его рекуперации. Начата разработка магнитной системы СЭО и системы передачи мощности на высокий потенциал.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Trubnikov G.V. et al.* Project of the Nuclotron-Based Ion Collider Facility (NICA) at JINR // Proc. of IPAC'10. Kyoto, Japan. MOPD011.
2. *Тиунов М.А., Фомель Б.М., Яковлев В.П.* SAM — интерактивная программа для расчета электронных пучков на мини-ЭВМ. Препринт ИЯФ СО АН СССР 89-159. Новосибирск, 1989.