

Проект электронного охладителя для института IMP (Ланжоу, Китай)

В.Н. Бочаров, А.В. Бублей, В.Ф. Веремеенко, А.Д. Гончаров, И.В. Горнаков,
Б.И. Гришанов, А.А. Диденко, Ю.А. Евтушенко, И.В. Казарезов, А.Н. Кергинский,
В.И. Кокоулин, В.В. Колмогоров, Е.С. Константинов, С.Г. Константинов, Г.С. Крайнов,
А.М. Крючков, А.С. Медведко, Д.Г. Мякишев, В.М. Панасюк, В.В. Пархомчук, С.П. Петров,
Д.В. Пестриков, В.Б. Рева, Е.Р. Семенов, Б.А. Скарбо, А.Н. Смирнов,
Б.М. Смирнов, Б.Н. Сухина, В.С. Тупиков, В.В. Широков, К.К. Шрайнер

ИЯФ им. Г.И. Будкера, Новосибирск, Россия

Х. Янг

Институт современной физики, Ланжоу, КНР

Представлен проект установок электронного охлаждения на энергию электронов 35 и 300 кэВ. Основанные на технологии ИЯФ эти автономные установки электронного охлаждения включают электронную пушку и коллектор, магнитную систему и соответствующую систему питания с высоковольтными терминалами.

Введение

Описываемые в работе установки электронного охлаждения разработаны для проекта CSR (Институт современной физики, IMP, Ланжоу, Китай) и являются развитием идей уже реализованных в проекте охладителя для SIS (Дармштадт, Германия) [1], разработанного и изготовленного в ИЯФ им. Будкера (Новосибирск). Центральная часть магнитной системы (длинный соленоид участка охлаждения) предполагается сделать из отдельных коротких секций, как и в проекте для охладителя SIS. Но в отличие от охладителя SIS, в данных установках предусмотрена возможность корректировки положения каждой секции для достижения необходимых параметров не только для заданного значения магнитного поля. Для этого предусмотрена система механической юстировки каждой секции соленоида по полю с помощью оригинальной системы крепления секций, позволяющей осуществлять юстировку каждой секции по трем пространственным координатам.

Вторая отличительная особенность этих установок — использование электростатических поворотов на участках сведения электронных и ионных пучков. Для стабильной работы электронного охладителя необходимо надежно очищать электронный пучок от вторичных ионов и электронов. Для этого на траектории электронного пучка установлены электростатические электроды с поперечным полем для отсоса ионов и медленных электронов ионизации из пучка. Движение электрона с импульсом p_e в области тороида с радиусом поворота R приводит к дрейфовому движению в поперечном направлении. Для компенсации этого дрейфового движения обычно используют поперечное магнитное поле B_x :

$$eB_x v_e = \frac{p_e v_e}{R},$$

здесь v_e — скорость электрона.

Но этот тип компенсации увеличивает дрейфовое движение для электрона, движущегося в противоположном направлении со скоростью $-v_e$ в 2 раза. Более интересным кажется использовать электростатические поля E_r , которое компенсирует дрейф в обоих направлениях и производит сильную очистку электронного пучка от электронов и ионов низкой энергии:

$$eE_r = \frac{p_e v_e}{R}, \quad eE_r = \gamma \beta^2 \frac{E_0}{R},$$

где $E_0 = m_e c^2 = 510$ кэВ — энергия покоя электрона; $\gamma = \frac{T+E_0}{E_0}$; $\beta = \frac{v_e}{c}$ — релятивистские факторы; T — кинетическая энергия электрона.

Для $T = 300$ кэВ и $R = 1$ м требуется не слишком большая напряженность электрического поля $E_r = 4.89$ кВ/см. Использование только электростатического поворота эквивалентно отсутствию любого поворота для главного пучка. Это очень выгодно с точки зрения потерь электронного тока. Электроны с высокой энергией могут несколько раз осциллировать от коллектора к пушке, и эффективность рекуперации этих электронов в коллекторе должна быть очень высока. Комбинация области с магнитным полем и поворотным электрическим полем образует скоростной фильтр для оптимизации потерь.

Установка в тороидальных участках электростатических пластин с полем, одновременно обеспечивающем поворот и очистку, позволит улучшить работу установок при больших электронных токах (до 3 А). Вблизи ионного пучка поворот обеспечивается только поперечным магнитным полем, а в области электростатических пластин — комбинацией электрического и магнитного полей. Такое решение позволяет скомпенсировать удар от электрического поля на основной электронный пучок введением магнитного поля, а также управлять отраженным из коллектора электронным потоком и дает надежду уменьшить требуемое напряжение рекуперации.

Совмещение в конструкции электронных охладителей встроенных источников напряжения позволяет создать компактные установки. При этом надежная защита высоковольтных элементов позволит помещать это оборудование прямо на ионное накопительное кольцо без каких-либо ограждений и защит. Элегазовая изоляция SF₆ и масляное охлаждение коллектора позволят обеспечить долговременную эксплуатацию этого оборудования без значительных регламентных работ.

Размещение внутри охладителей измерительных пикап-электродов для контроля положения как ионного так и электронного пучков позволит более надежно обеспечивать оптимальные параметры охлаждения.

1. Основные параметры и особенности установок

Основные параметры установок электронного охлаждения ЭХ-35 и ЭХ-300 на энергию электронов 35 и 300 кэВ соответственно представлены в табл. 1. Общий вид установок электронного охлаждения показан на рис. 1 и 2.

Таблица 1: Основные параметры установок ЭХ-35 и ЭХ-300.

Параметры	ЭХ-35	ЭХ-300
Диапазон энергии: ионов [МэВ/н]	10-50	25-500
электронов, [кэВ]	4-35	10-300
Переванс электронной пушки, [$\mu A/V^{3/2}$]	2.5	2.5
Разброс по импульсу ионного пучка	$\pm 1.5 \cdot 10^{-3}$	$\pm 5 \cdot 10^{-3}$
Эмиттанс ионного пучка, ϵ_x, ϵ_y , [$\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$]	150, 20	30, 30
Ток электронного пучка, [А]	3	3
Максимальный диаметр электронного пучка на участке охлаждения, [см]	5	5
Диаметр катода, [см]	2.5	2.5
Магнитное поле на участке охлаждения, [кГс]	0.6-1.5	0.6-1.5
Длина соленоида охлаждения, [м]	4.0	4.0
Параллельность поля в соленоиде охлаждения	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$
Потери электронов (коэффициент рекуперации)	$\leq 3 \cdot 10^{-4}$	$\leq 3 \cdot 10^{-4}$
Вакуум на участке охлаждения, [Торр]	$2 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-11}$

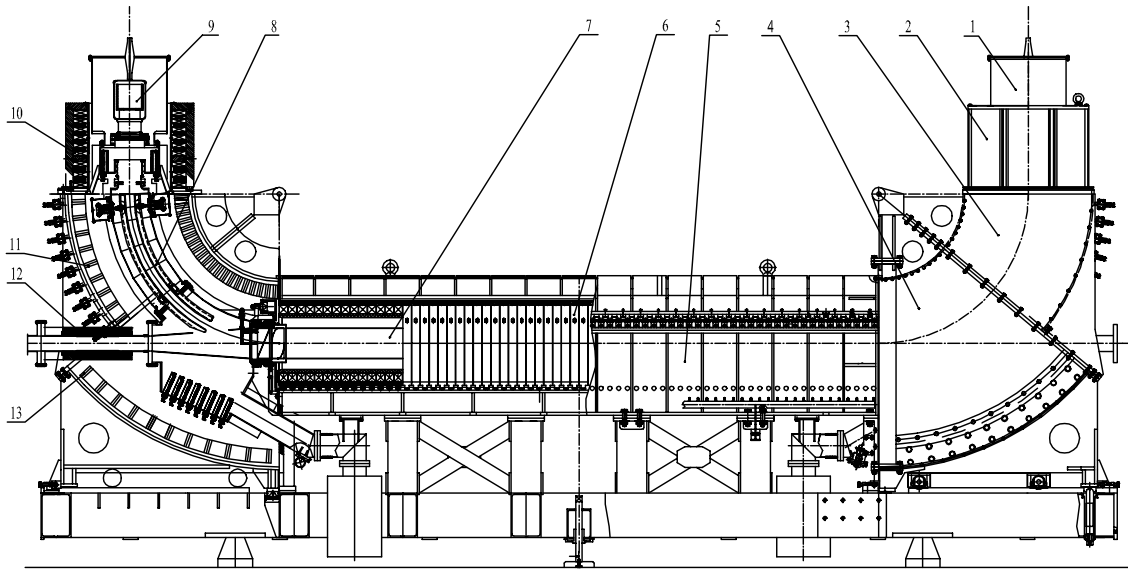


Рис. 1: Общий вид установки электронного охлаждения ЭХ-35 на энергию электронов 35 кэВ. 1 – электронная пушка; 2 – соленоиды пушки; 3 – тороид 40°; 4 – тороид 50°; 5 – основной соленоид охлаждения; 6 – катушка основного соленоида; 7 – вакуумная камера; 8 – электростатический дефлектор; 9 – коллектор; 10 – соленоиды коллектора; 11 – катушка тороида 40°; 12 – крректирующий магнит; 13 – катушка тороида 50°.

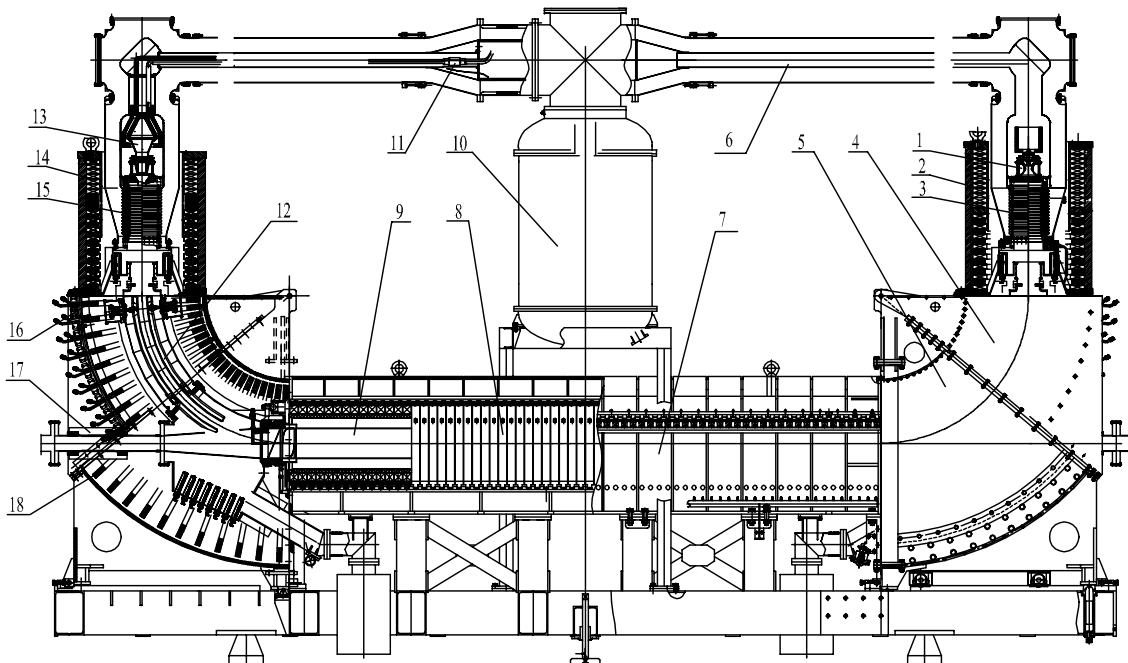


Рис. 2: Общий вид установки электронного охлаждения ЭХ-300 на энергию электронов 300 кэВ. 1 – электронная пушка, 2 – соленоиды пушки; 3 – ускорительная трубка; 4 – тороид 40°, 5 – тороид 50°; 6 – высоковольтный элегазовый фидер; 7 – основной соленоид охлаждения; 8 – катушка основного соленоида; 9 – вакуумная камера; 10 – выпрямитель на 300 кВ; 11 – система охлаждения коллектора; 12 – электростатический дефлектор; 13 – коллектор; 14 – соленоиды коллектора; 15 – замедляющая трубка; 16 – катушка тороида 40°; 17 – крректирующий магнит; 18 – катушка тороида 50°.

Электронные охладители ЭХ-35 и ЭХ-300 состоят из следующих основных частей:

- Магнитная система, которая формирует и транспортирует электронный пучок от электронной пушки до коллектора электронов.
- Электронная пушка и коллектор электронов.
- Вакуумная камера с системой прогрева и откачки.
- Система высоковольтного и низковольтного питания .
- Система охлаждения коллектора.

Как видно из рисунков, общая компоновка электронных охладителей ЭХ-35 и ЭХ-300 идентична, заметно отличается выполнение высоковольтных частей установок, обусловленное значениями требуемой энергии электронных пучков — 35 и 300 кВ соответственно.

Так как требования к основным техническим параметрам и геометрическим размерам участков охлаждения установок ЭХ-35 и ЭХ-300 совпадают, то эти части установок, включая основной соленоид участка охлаждения, вакуумную камеру с системой прогрева и откачки, тороидальные повороты с электростатической системой отклонения, а также подставки, выполняются из одних и тех же элементов. Это заметным образом сокращает время разработки и стоимость изготовления установок.

Одной из особенностей электронной пушки является управление размером пучка с помощью управляющего электрода. Расчеты показывают, что при изменении разности потенциалов между управляющим электродом пушки и катодом до 2 кВ можно уменьшить размер пучка в 1.5 раза.

Коллектор электронов должен рассеивать среднюю мощность до 15 кВт при напряжении 5 кВ и должен иметь относительные потери электронного тока на уровне $\leq 3 \cdot 10^{-4}$ при токе 3 А. Коллектор изготавливается в виде аксиально-симметричного медного элемента диаметром 18 см и длиной 17 см с охлаждающими каналами внутри. В качестве охлаждающей жидкости решено использовать трансформаторное масло. Трансформаторное масло циркулирует через систему каналов охлаждения коллектора и радиатор, которые вместе с соединяющими их трубопроводами образуют замкнутый контур. Охлаждение радиатора осуществляется проточной водой из общей системы охлаждения установок под потенциалом уровня “земли”.

Оптимальные параметры охлаждения во многом определяются качеством магнитного поля на участке охлаждения. Для достижения требуемых параметров неоднородности магнитного поля использовалась программа для трехмерных расчетов электромагнитных полей MASTAC [3].

Список литературы

- [1] M. Steck et. al. Comissioning of the electron cooling device in the ion synchrotron SIS, EPAC'98, Stockholm, June 1998.
- [2] B.N. Sukhina et. al. Conceptual project of an electron cooling system at energy of electrons of 350 keV, NIM A 441 (2000) pp. 87-91.
- [3] Rojak M., Shurina E., Soloveichik Yu., Grudiev A., Tiunov M., Vobly P. MASTAC - new code for solving three-dimensional non-linear magnetostatic problems. Proceed. of PAC'95, Dallas, 1995.