

## СИСТЕМА ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА ВЫСОКУЮ ЭНЕРГИЮ ДЛЯ КОЛЛАЙДЕРА NICA

*В. Б. Рева<sup>а,б,1</sup>, А. М. Батраков<sup>а</sup>, О. В. Беликов<sup>а</sup>, Е. А. Бехтенов<sup>а</sup>,  
М. И. Брызгунов<sup>а</sup>, А. В. Бублей<sup>а</sup>, Р. В. Вахрушев<sup>а</sup>, А. Д. Гончаров<sup>а</sup>,  
К. М. Горчаков<sup>а,б</sup>, И. А. Гусев<sup>а</sup>, А. П. Денисов<sup>а</sup>, А. В. Иванов<sup>а</sup>,  
А. А. Жариков<sup>а</sup>, Г. В. Карпов<sup>а</sup>, М. Н. Кондауров<sup>а</sup>,  
В. М. Константинов<sup>а</sup>, В. Я. Корчагин<sup>а</sup>, В. И. Кремнев<sup>а</sup>, Н. С. Кремнев<sup>а</sup>,  
П. Е. Мураткозиев<sup>а</sup>, А. В. Павленко<sup>а</sup>, В. М. Панасюк<sup>а</sup>,  
В. В. Пархомчук<sup>а</sup>, А. В. Петрожицкий<sup>а,б</sup>, В. А. Полухин<sup>а</sup>,  
Л. С. Посполита<sup>а</sup>, С. П. Посполита<sup>а</sup>, Д. Н. Пурескин<sup>а</sup>,  
А. А. Путьмаков<sup>а</sup>, С. И. Рувинский<sup>а</sup>, Д. В. Сеньков<sup>а,б</sup>,  
Д. Н. Скоробогатов<sup>а</sup>, Э. Р. Уразов<sup>а,б</sup>, В. А. Чекавинский<sup>а</sup>,  
В. Г. Ческидов<sup>а</sup>, С. В. Шиянков<sup>а</sup>, К. С. Штро<sup>а</sup>, Л. М. Щеголев<sup>а</sup>*

<sup>а</sup> Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>б</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, Россия

Электронное охлаждение ионных пучков играет ключевую роль в проекте коллайдера NICA. Для достижения необходимой светимости важно обеспечить эффективное охлаждение во время накопления пучка и во время эксперимента. Для этой цели в проекте предусмотрены система стохастического и две системы электронного охлаждения (СЭО). Изготовленный в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера электронный охладитель для бустера NICA уже показал свою эффективность на энергии инжекции. Описывается часть основных принципов, заложенных в создание СЭО на 2,5 МэВ для коллайдера, способной работать на энергии физического эксперимента для увеличения светимости комплекса.

Electron cooling of ion beams plays a key role in the NICA collider project. To achieve the required luminosity, it is important to ensure effective cooling during beam accumulation and during the experiment. For this purpose, the NICA complex design provides two electron and stochastic cooling systems. The electron cooler for the NICA booster manufactured at the Budker Institute of Nuclear Physics (BINP SB RAS) has already shown its efficiency at the injection energy. This paper describes some of the principles established for the construction of a 2.5 MeV cooler for the NICA collider capable of operating at the experiment energy to increase the luminosity of the complex.

PACS: 29.20.—c

---

<sup>1</sup>E-mail: V.B.Reva@inp.nsk.su

## ВВЕДЕНИЕ

Электронное охлаждение [1–3] является хорошо зарекомендовавшим себя методом получения ионных пучков с низким эмиттансом и малым разбросом по импульсам. В этом методе фазовая плотность ионного пучка увеличивается за счет диссипативных сил, связанных с кулоновскими столкновениями ионов и электронов, последние из которых имеют более низкие поперечные и продольные температуры в сопутствующей системе отсчета. Одним из примеров установки электронного охлаждения на высокую энергию является система электронного охлаждения (СЭО) синхротрона COSY на энергию до 2 МэВ. Установка была разработана в ИЯФ СО РАН и установлена в синхротрон в 2013 г. [4, 5], на ней были проведены успешные эксперименты по охлаждению пучков протонов при различной энергии [6]. На данной установке был использован стандартный для СЭО метод электростатического ускорения электронов до требуемой энергии и она имеет наибольшую энергию электронов среди всех когда-либо созданных СЭО, реализующих электрон-ионные взаимодействия в сильном продольном магнитном поле («замагниченное» или «быстрое» охлаждение).

Практически со времени создания первого электронного охладителя было понятно, что использование электростатического ускорителя для электронов имеет ограничение по максимальной энергии примерно 10 МэВ: более высокие напряжения связаны с серьезными техническими трудностями. Очевидным решением данной проблемы является использование линейных ускорителей электронов с высокочастотными (ВЧ) резонаторами. Проект LEReC (Low Energy RHIC electron Cooler), реализованный в BNL (США) для коллайдера RHIC [7], позволил получить охлаждение ионов при энергии электронов 1,6 и 2 МэВ. Электронный пучок из источника с фотокаатодом ускорялся набором различных резонаторов, в которых происходили ускорение, группировка пучка и компенсация эффектов от электромагнитных полей, наведенных в резонаторах и связанных с пространственным зарядом интенсивного электронного пучка. После взаимодействия с высокозарядными ионами первого кольца коллайдера электроны разворачивались в дипольном магните на  $180^\circ$  и взаимодействовали с ионами во втором кольце. Такая схема требует точной настройки всех трех колец ускорительного комплекса как по энергии, так и по оптике для пространственного совмещения взаимодействующих частиц.

Уже в первых экспериментах по охлаждению ионов  $\text{Au}^{79+}$  на энергии электронов 1,6 МэВ удалось добиться уменьшения длины ионных сгустков (банчей) при увеличении пиковой интенсивности, что означало наличие продольного электронного охлаждения. Развитие данного эксперимента привело к увеличению светимости на энергии физического эксперимента от 50 % до двух раз. Таким образом, впервые в мире было продемонстрировано успешное использование электронного охлаждения в экспериментах на коллайдере.

В настоящее время в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна, Россия) строится ускорительный комплекс NICA для экспериментов по поиску смешанной фазы ядерной материи во встречных ион-ионных столкновениях. В связи с требованиями к светимости коллайдера необходимо использование охлаждения ионных пучков непосредственно в режиме столкновений. Для этого коллайдер будет оборудован системами стохастического и электронного охлаждения [8]. На рис. 1 показана трехмерная модель СЭО коллайдера NICA. Максимальная энергия элект-

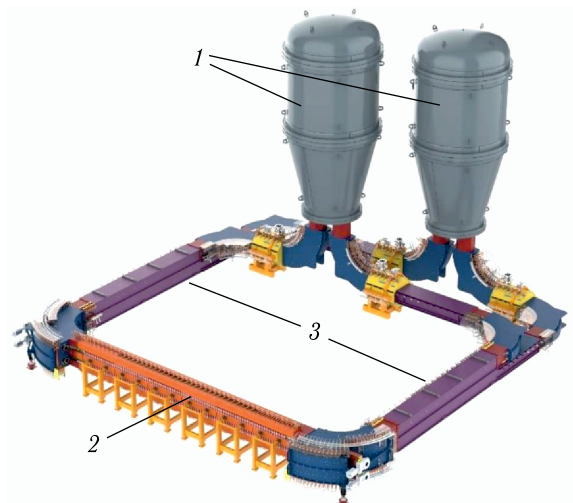


Рис. 1. Трехмерная модель СЭО коллайдера NICA: 1 — баки высоковольтной системы; 2 — секция охлаждения; 3 — транспортные каналы

тронов 2,5 МэВ позволит охлаждать ионы во всей доступной области энергии для экспериментов на ионах. Система представляет собой два практически независимых охладителя, что позволяет охлаждать оба пучка в коллайдере, даже если их энергии будут различаться.

## 1. ОПТИКА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Оптика СЭО на 2,5 МэВ для коллайдера NICA спроектирована по аналогии с конструкцией классических СЭО на низкую энергию. Движение электронного пучка замagnetичено (или близко к замagnetиченному состоянию) на всей траектории — от пушки до коллектора, т. е. продольная составляющая магнитного поля намного больше поперечной и оказывает доминирующее влияние на параметры движения заряженной частицы.

Магнитная система каждой из СЭО состоит из катушек пушки и коллектора, катушек ускорительных/замедляющих трубок, транспортных каналов, проходящих от высоковольтного бака до секции охлаждения и обратно, а также секции охлаждения. Транспортные каналы содержат четыре поворотных магнита (Bend) на  $90^\circ$ , два магнита с названием тороид (Tog90), которые кроме поворота на  $90^\circ$  электронного пучка обеспечивают его совмещение с ионным пучком, две согласующие секции между высоковольтным баком и транспортным каналом, две согласующие секции между транспортным каналом и секцией охлаждения и три прямые секции технологического назначения. Переход от магнитного поля транспортного канала к секции охлаждения сделан на прямолинейном участке, что привело к уменьшению эффективной длины секции охлаждения, но существенно облегчило конструирование тороидального магнита, совмещающего электронный и ионный пучок, так как в нем расчетное продольное поле в 2 раза ниже, чем в случае, если переход между полями осуществлять в транспортном канале. Меньшее поле в тороиде означает существен-

но меньшее энергопотребление. Это являлось одним из ограничивающих факторов при проектировании, а фиксированное расстояние между пучками 32 см ограничивало возможность вместить в конструкцию достаточное количество меди. Кроме того, наличие перехода существенно уменьшило влияние оптики электронного пучка на оптику ионного, так как элемент с максимальным полем — это просто прямолинейный соленоид секции охлаждения, а влияние тороида, где на ионы действует комбинация продольных и поперечных полей, существенно снижено.

Расчетное магнитное поле в секции охлаждения принято равным 2 кГс, чтобы иметь максимальное число ларморовских колебаний ( $\sim 20$ ) электрона при его взаимодействии с ионом, что обеспечивает условие замагниченности кулоновских столкновений даже на самой высокой энергии электрона — 2,5 МэВ.

Проектное значение магнитного поля в ускорительной трубке принято равным 500 Гс. Эта величина связана с максимальной мощностью, которую можно передать элементам, находящимся под высоким потенциалом, с помощью каскадного трансформатора.

Значение поля в транспортном канале находится в диапазоне 0,5–1 кГс. Энергия 2,5 МэВ достаточна для того, чтобы не соблюдалось полностью условие адиабатического движения для электронов, поэтому для транспортировки пучка используется принцип «резонансной оптики», когда продольное магнитное поле поворотных элементов выбрано так, чтобы на их длине укладывалось «правильное» число ларморовских длин. В таком случае «удар» при входе в поворот компенсируется «ударом» при выходе и возбуждение поперечного движения электрона мало. «Удар» возникает из-за того, что профиль силовой линии магнитного поля не совпадает с профилем поворотного (вертикального) поля в поворотном магните.

Переход от магнитного поля ускорительных трубок к транспортному каналу осуществляется с помощью 7 катушек с независимыми источниками питания, принцип работы которых был практически проверен на СЭО COSY [9]. Переход от транспортного канала к секции охлаждения расположен между тороидом и секцией охлаждения на прямолинейном участке. С одного края он состоит из катушек типа insert для того, чтобы выполнить поворот на  $90^\circ$  максимально симметричным образом для минимизации возбуждения ларморовского движения. С другого края расположены катушки, на которых присутствуют корректоры продольного поля. В этой области магнитное поле сильное, а движение электронов уже близко к адиабатическому. Расчеты показывают, что согласование можно реализовать за счет правильного расположения этих катушек и небольшого числа корректоров. Если в каких-то режимах этого будет недостаточно для регулировки профиля продольного поля, то можно дополнительно использовать регулируемый токовый шунт, позволяющий менять ток в катушках основного поля. На рис. 2 показано распределение полей в этой области. Измерения выполнены при половинном поле в секции охлаждения и в транспортном канале. Секция тороида в данных измерениях отсутствовала.

Настройка оптики электронного пучка требует совместного измерения карт магнитных полей [10] всех элементов совместно с проведением расчетов. Полный расчет всей системы сопряжен с необходимостью учитывать крайне большое число элементов и слабой возможностью делить установку на сегменты. В отличие от стандартных ускорительных структур здесь нет четкого разделения на краевое поле, поле элемента и поля соседних элементов. Такие же сложности возникают и при проведении



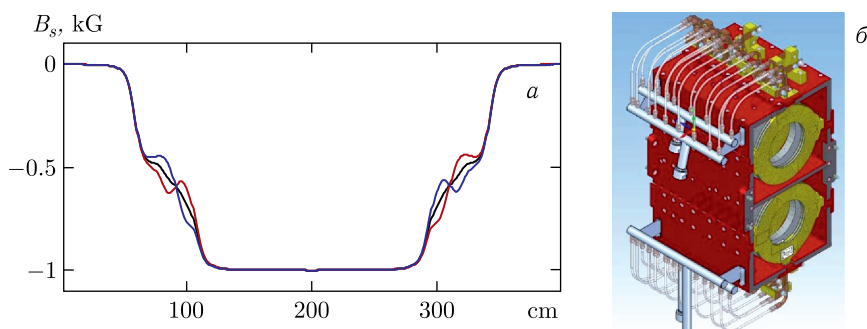


Рис. 2. Перестройка продольного поля в области перехода между транспортным каналом и секцией охлаждения. Значение тока корректоров продольного поля  $\pm 10$  А

измерений, когда нет возможности пройти всю магнитную систему в одном проходе измерительного датчика. Поэтому и в том, и в другом случае приходится анализировать распределение полей в условных фрагментах (отдельный магнитный элемент с ближайшим окружением) и по отдельности, проверяя данные расчетов измерениями, и наоборот.

Так, для расчета полей поворотного магнита (Bend) из системы СЭО выделялся фрагмент, состоящий, собственно, из поворота и двух метровых отрезков транспортных каналов с прямолинейными соединительными вставками (Line + Insert). Последние выполнены катушками малой длины и служат для организации места, в котором можно провести технологическую сборку вакуумной камеры, разместить выводы пикапов и короткие корректирующие катушки для уменьшения циклотронного вращения электронного пучка. Схема этого фрагмента показана на рис. 3.

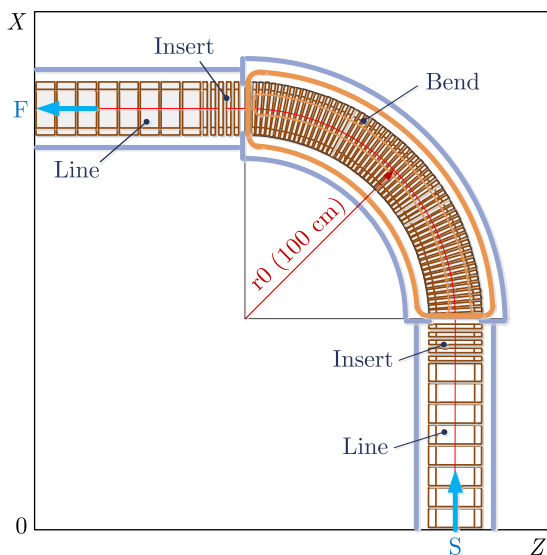


Рис. 3. Схема расчетного фрагмента поворотного магнита

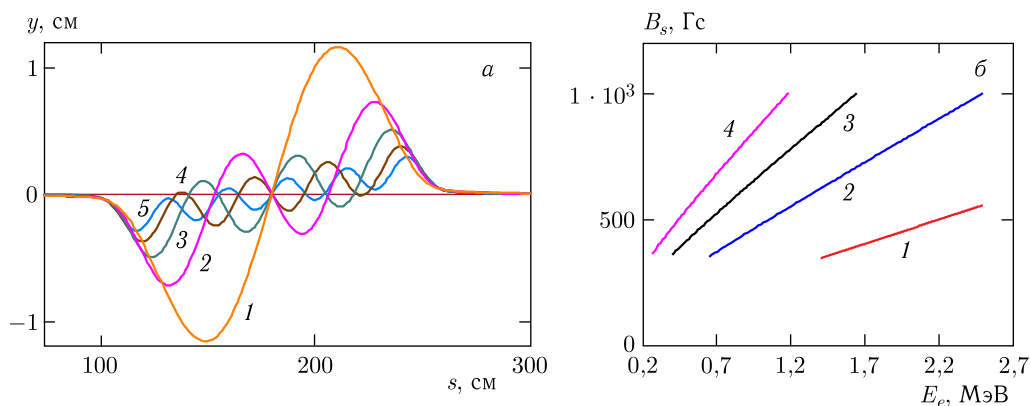


Рис. 4. а) Моделирование поперечного движения электронов ( $y$ -компонента) при различных значениях «резонансной» энергии:  $E_e = 4,865$  (1), 2,5 (2), 1,65 (3), 1,185 (4) и 0,905 (5) МэВ. б) Зависимость резонансного значения продольного магнитного поля от энергии электронов

Моделью для расчета является «кольцо» из четырех таких фрагментов. Это позволяет существенно упростить расчеты за счет использования плоскостей симметрии  $Z = 0$  и  $X = 0$ . При таком подходе решается вопрос сшивки расчетов на стыках соседних фрагментов магнитной системы СЭО.

Пример расчета движения в поворотном магните с продольным полем в случае сильно замагниченного движения приведен на рис. 4, где показаны траектории электронов для энергий  $E_e = 4,865$ , 2,5, 1,65, 1,185 и 0,905 МэВ, которые обозначены цифрами от 1 до 5. В результате моделирования определена такая конфигурация магнитных полей, при которой стартующий вдоль осевой линии (S) электрон с заданной энергией приходит на финиш (F) без «нагрева» (без ларморовского вращения). Это можно сделать для нескольких фиксированных значений энергии электронов. Продольное магнитное поле в расчетах равно 1 кГс. Для реализации работы в широком диапазоне энергий можно использовать «синхротронный» принцип, когда значения магнитных полей уменьшаются в  $\gamma\beta$  раз при уменьшении энергии от расчетного значения. Поэтому моделирование движения на энергию  $E_e = 4,865$  МэВ также имеет смысл, несмотря на то, что данная энергия не предусмотрена в работе СЭО. Из нее можно получить рабочие режимы при энергии меньше 2,5 МэВ, но при пониженном значении продольного магнитного поля. На рис. 4, б показана диаграмма выбора рабочей точки СЭО в зависимости от энергии. Видно, что с уменьшением энергии число доступных значений продольного магнитного поля возрастает, так как при 1 кГс удастся уложить на длине поворота различное число ларморовских спиралей.

## 2. КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ

Для достижения необходимой энергии электронного пучка используется принцип прямого электростатического ускорения. Схема электростатического ускорителя для одной системы электронного охлаждения коллайдера NICA показана на рис. 5. В со-

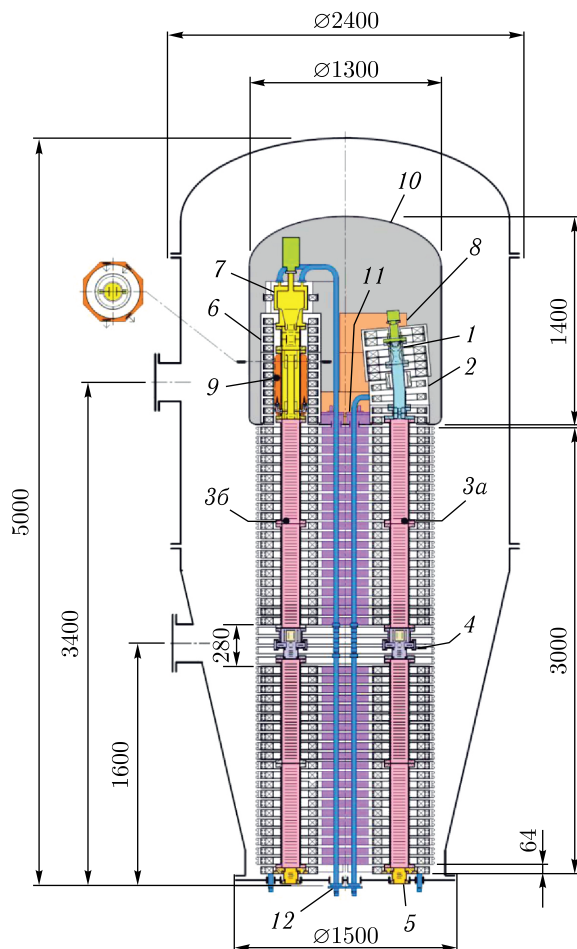


Рис. 5. Схема электростатического ускорителя: 1 — пушка; 2 — соленоид пушки; 3а — ускоряющая трубка; 3б — замедляющая трубка; 4 — пикап и узел вакуумной откачки; 5 — компенсаторная опора с сифоном; 6 — соленоид коллектора; 7 — коллектор; 8 — управляющая электроника; 9 — фильтр Вина; 10 — кожух высоковольтного терминала; 11 — высоковольтный каскадный трансформатор; 12 — трубы масляного охлаждения

став ускорительной колонны входят две ускорительные трубки, секции с источниками высокого напряжения и магнитного поля и питающий их каскадный трансформатор. Ускорительная колонна состоит из 42 секций с шагом 64 мм, высота секции 48 мм и зазор между секциями 16 мм. Сверху ускорительной колонны установлены высоковольтный терминал, содержащий пушку, коллектор с фильтром Вина и вся электроника для управления ими. Пушка и коллектор помещены в продольное магнитное поле, создаваемое двумя соленоидами в высоковольтном терминале.

Весь электростатический ускоритель помещен в высоковольтный бак с конструкцией, аналогичной СЭО для COSY. Бак рассчитан на давление элегаза до 12 атм.

В нем имеются два боковых фланца для установки дополнительного оборудования для связи и диагностики.

В отличие от электростатического ускорителя COSY колонна СЭО коллайдера NICA разделена промежуточной секцией. Опыт разработки высоковольтного охладителя COSY показал, что для столь длинных электростатических трубок желательно иметь дополнительную вакуумную откачку в их центре. Кроме того, дополнительная диагностика в виде пикапов в трубке может значительно упростить процесс настройки СЭО. В промежуточной секции не будет высоковольтных источников питания, но будут размещены дополнительные насосы вакуумной откачки, пикапы и дипольные корректоры для настройки прохождения пучка в ускорительной трубке. В этой же секции будут коммутироваться две половины каскадного трансформатора, который решено разбить по длине на две равные части для удобства сборки.

На рис. 6 показана схема секции высоковольтной колонны. Каждая секция содержит две катушки магнитного поля (одна — для ускоряющей трубки, другая — для замедляющей), блок питания для катушек, высоковольтный выпрямитель на 60 кВ, 1 мА тока (2 блока на  $\pm 30$  кВ) и блок электроники для связи и управления секцией. Поскольку в данной установке СЭО высоковольтная колонна выше, чем в COSY, то ее энергопотребление будет больше. Поэтому для питания электроники было решено использовать два каскадных трансформатора (один — для питания высоковольтной колонны, второй — для высоковольтного терминала). Вся электроника помещена

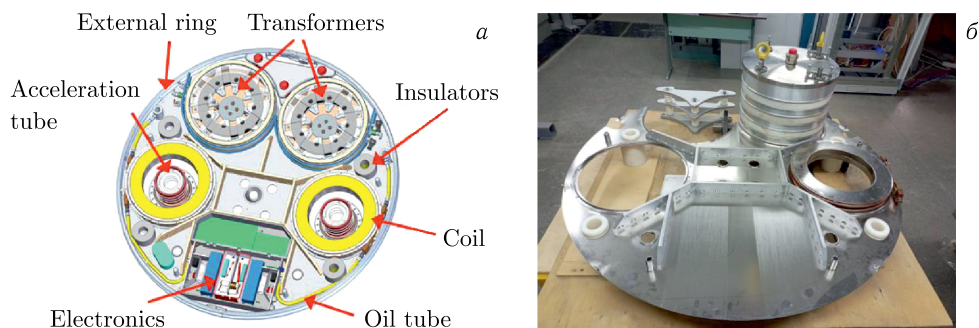


Рис. 6. Схема секции высоковольтной колонны (а) и внешний вид ее корпуса (б)

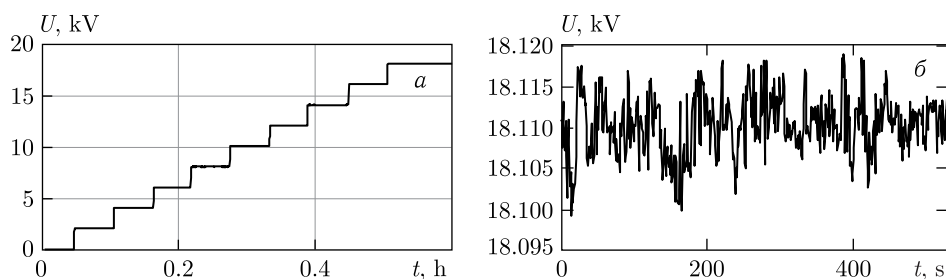


Рис. 7. Перестройка напряжения на высоковольтной секции в процессе ее настройки (а) и стабильность напряжения (б) при испытании на воздухе

в металлический корпус для защиты на случай высоковольтного пробоя. Кроме того, корпус самой секции также представляет собой практически закрытый металлический ящик, обеспечивающий дополнительную защиту. Секция опирается на предыдущую секцию за счет четырех изолирующих стоек. Катушки и электроника охлаждаются трансформаторным маслом. Корпус секции усилен за счет дополнительных ребер жесткости.

На рис. 7 представлен результат испытаний электроники одной секции. На рис. 7, *а* продемонстрировано увеличение напряжения до максимального значения на воздухе, на рис. 7, *б* — стабильность высокого напряжения, достижимая с использованием внутреннего прецизионного делителя напряжения. Опыт использования СЭО на синхротроне COSY показывает возможность уверенной перестройки энергии электронного пучка на уровне 20–30 В при полном напряжении 1 МВ, что контролировалось за счет изменения частоты обращения протонного пучка.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью разработанной в ИЯФ СО РАН системы СЭО планируется достичь рекордной энергии электронов при использовании сильного продольного поля и концепции «замагниченной» оптики электронного пучка. Это, в свою очередь, позволит достичь максимально широкой области энергии, в которой можно осуществлять электронное охлаждение. В качестве основы для реализации проекта использовался опыт работы СЭО, созданной для синхротрона COSY, на котором было получено успешное электронное охлаждение в области энергий 100–1200 кэВ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будкер Г. И. Эффективный метод демпфирования колебаний частиц в протонных и антипротонных накопителях // АЭ. 1967. Т. 22, № 5. С. 346–348.
2. Скринский А. Н., Пархомчук В. В. Методы охлаждения пучков заряженных частиц // ЭЧАЯ. 1981. Т. 12, вып. 3. С. 557–613.
3. Диканский Н. С., Мешков И. Н., Пархомчук В. В., Скринский А. Н. Развитие методов охлаждения ионов // УФН. 2018. Т. 188, вып. 5. С. 481–492.
4. Reva V. B., Alinovskiy N. I., Bedareva T. V. *et al.* Commissioning COSY Cooler with Electron Beam at Novosibirsk // Proc. COOL'13, Murren, Switzerland, June 10–14, 2013. P. 79–83.
5. Reva V. B., Alinovskiy N., Batrakov A. M. *et al.* The First Commission Results of the High Voltage Magnetized Cooler for COSY // Proc. COOL'11, Alushta, Ukraine, Sept. 12–16, 2011. ТНІОА02. P. 37–42.
6. Брызгунов М. И., Камерджиев В. С., Пархомчук В. В., Рева В. В. Особенности динамики охлаждения на высоковольтной установке электронного охлаждения в COSY // ЖТФ. 2015. Т. 85, вып. 8. С. 124–131.
7. Fedotov A. V., Fischer W., Gu X., Kayran D., Kewisch J., Minty M. G., Schoefer V., Seletskiy S., Zhao H. Electron Cooling of Colliding Ion Beams in RHIC: Status and Perspectives // Proc. Workshop on Beam Cooling and Related Topics COOL2021, Novosibirsk, Russia, 2021. P. 42–47.
8. Технический проект ускорительного комплекса NICA / Ред.: И. Н. Мешков, Г. В. Трубников. Дубна, 2015.

9. Bryzgunov M. I. *et al.* Calculation of Electron Beam Motion in Electron Cooling System for COSY // Proc. COOL'09, Lanzhou, China, Sept. 2009. THPMCP004. P. 134.
10. Reva V. B., Batrakov A. M., Bryzgunov M. I., Bublely A. V., Vakhrushev R. V., Gorchakov K. M., Gosteev V. K., Denisov A. P., Kondaurov M. N., Konstantinov V. M., Korchagin V. Ya., Kremnev N. S., Panasyuk V. M., Parkhomchuk V. V., Pospolita S. P., Putnikov A. A., Shtro K. S. Testing of Magnetic Elements of the Electron Cooling System for the NICA Collider // Phys. Part. Nucl. Lett. 2023. V. 20, Iss. 4. P. 872–879.

Получено 28 октября 2024 г.