

## Полвека развития электронного охлаждения в Институте ядерной физики СО РАН

М.И. Брызгунов, А.В. Бублей, Н.С. Диканский, Н.С. Кремнев, В.А. Лебедев,  
И.Н. Мешков, А.Н. Скринский, Б.Н. Сухина, В.В. Пархомчук, Д.В. Пестриков, В.Б. Рева

*Представлена история создания метода формирования ионных пучков при взаимодействии с электронным пучком. Способ формирования этого пучка и особенности его применения получили название "электронное охлаждение". Описано развитие данного метода от начальной идеи, представленной его автором, первым директором Института ядерной физики (ИЯФ) в Новосибирске Г.И. Будкером, до его реализации и распространения по ускорительным лабораториям мира.*

**Ключевые слова:** накопитель антипротонов, электронное охлаждение (ЭО), электронная пушка, резонансная оптика, коллектор, рекуперация, соленоид, система электронного охлаждения (СЭО), магниты, замагниченность электронов, время жизни протонов, температура частиц

PACS numbers: 29.20.db, 29.27.Bd

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.09.039750>

### Содержание

1. Введение (101).
  2. Как всё начиналось (101).
  3. Мы свой, мы новый проект встречных антипротон-протонных пучков построим (102).
  4. Первые экспериментальные исследования электронного охлаждения (103).
  5. Создание диагностики охлаждённого пучка (103).
  6. Установка для измерения силы трения в однопролётном режиме (105).
  7. За границе мы поможем (106).
  8. Десант из Новосибирска (108).
  9. Система электронного охлаждения ускорительного комплекса NICA (109).
  10. Заключение (111).
- Список литературы (111).

### 1. Введение

В мае 1974 г. был зафиксирован первый эффект — смещение ионного пучка при включении электронного, со-

провождавшего ионный на одном из четырёх прямолинейных участков синхротрона накопителя антипротон-модель (НАП-М). С тех пор прошло 50 лет, и метод воздействия на ионный пучок, известный как "электронное охлаждение" (ЭО), стал одним из наиболее удобных и действенных способов оптимизации параметров ионного пучка, циркулирующего в синхротроне. Истории появления метода ЭО, его развитию и современным проектам с использованием ЭО посвящена настоящая статья.

### 2. Как всё начиналось

Первые дискуссии об электронном охлаждении у Андрея Михайловича Будкера<sup>1</sup> с А.Н. Скринским начались в 1965 г. с обсуждения, как получить мощные протонные пучки. Интерес к электронному охлаждению у Александра Николаевича возник, когда он сообразил, что это путь получения встречных антипротон-протонных пучков (ВАПП).

Андрей Михайлович активно поддержал данную идею через три дня размышлений. В 1966 г. Будкер, уже после возвращения из совместного с А.Н. Скринским путешествия по США, доложил эту идею (электронное охлаждение и встречные пучки в проекте ВАПП) на международной конференции в Орсе [1].

В 1967 г. в Институте ядерной физики (ИЯФ) Сибирского отделения АН СССР начались активные обсуждения физики электронного охлаждения и деталей конструкции охлаждающего устройства. Был привлечён И.Н. Мешков, который вскоре завершил свои работы по другому проекту Г.И. Будкера — "Релятивистский стабилизированный электронный пучок" и переключил-

М.И. Брызгунов<sup>(1,a)</sup>, А.В. Бублей<sup>(1)</sup>, Н.С. Диканский<sup>(1,b)</sup>,  
Н.С. Кремнев<sup>(1)</sup>, В.А. Лебедев<sup>(2,c)</sup>, И.Н. Мешков<sup>(2)</sup>,  
А.Н. Скринский<sup>(1,d)</sup>, Б.Н. Сухина<sup>(1)</sup>, В.В. Пархомчук<sup>(1,e)</sup>,  
Д.В. Пестриков<sup>(1)</sup>, В.Б. Рева<sup>(1,f)</sup>

<sup>(1)</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,  
просп. Академика Лаврентьева 11, 630090 Новосибирск,  
Российская Федерация

<sup>(2)</sup> Объединённый институт ядерных исследований,  
ул. Жолио-Кюри 6, 141980 Дубна, Московская обл.,  
Российская Федерация

E-mail: <sup>(a)</sup> M.I.Bryzgunov@inp.nsk.su, <sup>(b)</sup> dikansky@inp.nsk.su,  
<sup>(c)</sup> valebedev@jinr.ru, <sup>(d)</sup> A.N.Skrinsky@inp.nsk.su,  
<sup>(e)</sup> parkhomchuk@inp.nsk.su, <sup>(f)</sup> V.B.Reva@inp.nsk.su

Статья поступила 19 августа 2024 г.

<sup>1</sup> Официально Будкер имеет имя и отчество Герш Ицкович. Но, как он рассказывал, ещё в его первый армейский год (по окончании университета в 1941 г. он добровольцем вступил в Красную Армию и служил в ПВО на Дальнем Востоке) он предложил солдатам "для ясности" именовать его Андреем Михайловичем. Так это Ф.И.О. и прижилось...

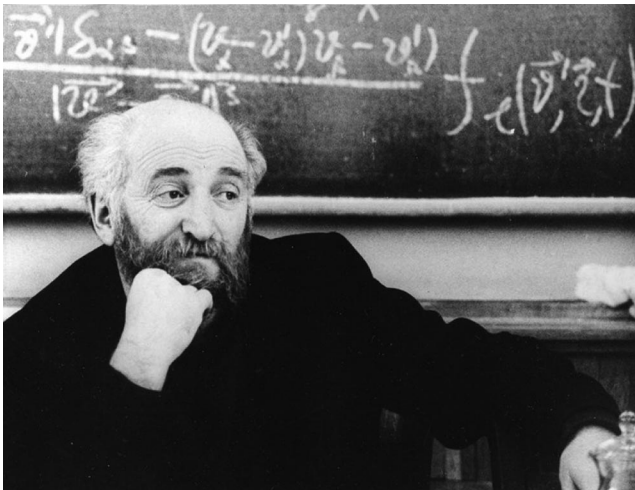


Рис. 1. Г.И. Будкер на защите диссертаций в 1975 г.

ся на работы по созданию установки с электронным пучком, охлаждающим антипротоны (ЭПОХА).

В начале Андрею Михайловичу нравилась квадратная фокусировка для электронного пучка, но, поскольку требовался большой ток охлаждающего пучка, то А.Н. Скринский и И.Н. Мешков убедили его, что продольное магнитное поле лучше соответствует поставленной задаче — не возбуждаются дополнительные поперечные скорости.

### 3. Мы свой, мы новый проект встречных антипротон-протонных пучков построим

Вскоре началось конструирование и изготовление *Прототипа установки*, состоящей из электронной пушки с резонансной оптикой и коллектора электронов, помещённых в трёхметровый соленоид с однородным магнитным полем, содержащий устройства для диагностики электронного пучка. В конце 1968 г. начались эксперименты на прототипе. В них активно участвовали студенты-физики Василий Пархомчук и Виктор Файнштейн, которых И.Н. Мешков пригласил из группы первого курса физического факультета НГУ, где он вёл семинары по физике.

Вскоре Андрей Михайлович, "с подачи" А.Н. Скринского, пригласил на электронное охлаждение (ЭО) Р.А. Салимова, который в то время занимался "холодной плазмой" и заслуженно получил характеристику талантливого экспериментатора.

Экспериментальные исследования на Прототипе шли напряжённо и интересно. Разрабатывали и испытывали главные элементы будущей системы электронного охлаждения (СЭО) — пушку, коллектор и соленоидную транспортировочную систему, обеспечивающие уникальные характеристики электронного пучка — малые поперечные скорости электронов при большой интенсивности пучка [2] и торможение электронов на коллекторе с низким, меньше  $10^{-3}$ , уровнем потерь электронов [3]. Не забыли и про диагностику электронного пучка [4]. Проблему рекуперации энергии электронного пучка нам существенно помогли решить специалисты Всесоюзного электротехнического института из лаборатории В.И. Переводчикова.

Одновременно шло конструирование и изготовление рабочего варианта СЭО ЭПОХА.

Параллельно развивался проект встречных антипротон-протонных пучков с накопителем антипротонов

(ВАПП-НАП), активным разработчиком которого был Н.С. Диканский [5]. Не отставали и теоретики, лидерами их группы были Я.С. Дербенев и Д.В. Пестриков. И всей этой "армией" руководил А.Н. Скринский [6].

Первая рабочая СЭО ЭПОХА была построена и испытана в 1970 г. [7]. Оставалось найти протонный пучок, который можно было бы охладить. Пробовали запускать протоны в накопитель встречных электрон-позитронных пучков (ВЭПП-3), уже построенный и находившийся в стадии запуска. Протоны пытались инжектировать из электростатического ускорителя Ван дер Граафа, однако отсутствие системы диагностики протонного пучка оказалось серьёзным препятствием. В это время в ИЯФ было принято решение сосредоточить все усилия на встречных электрон-позитронных пучках — коллайдерах ВЭПП-3 и ВЭПП-4. Из синхротрона НАП использовали только магниты и вакуумные камеры. Так появился "накопитель антипротонов — модель" (НАП-М).

Его создание также стоило больших трудов. Работы по сборке накопительного кольца НАП-М вместе с СЭО ЭПОХА и инжектором протонов — ускорителем Ван дер Граафа завершились в 1973 г., и начался запуск комплекса установок. Корректирующие магниты на концах дипольных магнитов не удалось получить из ИЯФовских мастерских, и первая проводка протонного пучка проводилась с помощью кусков постоянных магнитов, накладываемых на вакуумную камеру в местах расположения будущих корректоров. Положение протонного пучка наблюдалось на люминесцентных пробниках в конце длинных прямолинейных вакуумных труб. Выбирая правильное положение постоянных магнитов, можно было поставить орбиту пучка в центр вакуумной камеры в конце промежутка. Так была сформирована замкнутая орбита протонов. Это ускорило изготовление всех восьми корректирующих магнитов — успехи физиков стимулировали инженеров в мастерских ИЯФ.

Пора было приступить к ускорению протонов, но программный генератор для задачи согласования значений магнитного поля и частоты ВЧ-напряжения застрял в шестой лаборатории. Мы спешили начать ускорение протонов, дабы проверить работу нешихтованных электромагнитов. В качестве функционального генератора решено было использовать 32-полюсное шаговое реле с управлением от таймера. Величина магнитного поля измерялась датчиком Холла с коррекцией запаздывания сигнала напряжением с витка на полюсе магнита синхротрона. Виток последовательно подключался к одному из 32 переменных резисторов, а сигнал с резистора подавался на блок управления частотой ВЧ-напряжения. Регулируя ручку резистора, через который в данный момент шло ускорение, мы добивались сдвига частоты до следующей ступени. Это был "кусочный" преобразователь сигнала датчика Холла в частоту ВЧ-напряжения. Довольно быстро удалось ускорить протоны с энергии инжекции 1,5 МэВ до 65 МэВ. Чувствуя, что совсем скоро мы откажемся от блока управления, коллеги из шестой лаборатории "навалились" и выдали нам вождельный программный генератор, управляемый ЭВМ ОДРА. После этого мы успешно ускоряли протоны до нужной энергии, останавливая ускорение с сохранением протонного пучка.

Можно было начинать опыты с охлаждением, но тут выяснилось, что введение электронного пучка даже с током 50 мА мгновенно убивает протонный пучок. Разбирательство с гибелью пучка затянулось на несколько месяцев, пока не выяснилось, что виноваты распределённые вдоль электронного пучка ионные насосы. В ячейках ионных насосов происходила ионизация остаточного

газа. Образовавшиеся ионы приобретали большую энергию, рождаясь в поле с потенциалом 6 кВ (напряжение на пластинах ионного насоса) и в столкновениях с пластинами насоса "подхватывали" из них электрон, превращаясь в быстрый атом водорода. Такой атом мог попасть в электронный пучок, теряя свой электрон, и при достаточно большой энергии улетать на стенку вакуумной камеры. Эти потерянные электроны удерживаются магнитным полем солеоида СЭО и создают отрицательный потенциал, вызывающий гибель циркулирующих протонов. Распределённые ионные насосы тогда были большим изобретением, и такой эффект был для нас неожиданным. После пробного выключения ионных насосов протонный пучок вдруг перестал гибнуть, и в мае 1974 г. мы увидели первые положительные проявления электронного охлаждения.

#### 4. Первые экспериментальные исследования электронного охлаждения

Первые свидетельства электронного охлаждения на НАП-М в мае–июне 1974 г. зарегистрированы по кривой зависимости тока протонного пучка от времени. При оптимальной энергии электронного пучка протонный пучок имел достаточно большое время жизни. Конечно, вынужденное выключение ионных насосов приводило к сильному ухудшению вакуума и время жизни пучка составляло только 100 с, но для первых экспериментов этого было достаточно. Однако при отстройке энергии электронов от оптимума протонный пучок "увлекался" к отклонённой энергии и терялся за доли секунд.

Метод электронного охлаждения, предложенный и осуществлённый в ИЯФ СО АН СССР в Новосибирске под руководством А.М. Будкера, был впервые представлен на Всесоюзной конференции по ускорителям заряженных частиц в ноябре 1974 г. [8, 9].

После реконструкции вакуумной камеры, улучшения стабильности энергии электронов СЭО и качества магнитного поля НАП-М декременты охлаждения существенно выросли (выше  $1 \text{ с}^{-1}$ ), а время жизни пучка протонов достигло 20000 с [10–13]. Столь быстрое охлаждение определялось замагничностью поперечного движения электронов [6] и эффектом "сплюснутости" распределения электронов по скоростям [14]. После электростатического ускорения в электронной пушке поперечные скорости электронов сохранялись, а продольный разброс ста-

новился "почти нулевым" из-за сохранения энергии:

$$eU_0 + \frac{kT_{\text{cathode}}}{2} = \frac{m(V_0 + \Delta V)^2}{2}. \quad (1)$$

Это приводит к малому разбросу скоростей в сопутствующей системе:

$$\Delta V = \frac{kT_{\text{cathode}}}{2mV_0}, \quad E_k = \frac{(kT_{\text{cathode}})^2}{4eU_0}. \quad (2)$$

Конечно, при температуре на катоде  $kT_{\text{cathode}} = 0,1 \text{ эВ}$  и ускорении до энергии 35 кэВ тепловой разброс становился фантастически малым и соответствовал температуре примерно 1 К. Такая ситуация сильно отличалась от модели шарика по всем направлениям скоростей, которую использовал Г.И. Будкер [1]. В замагниченном электронном пучке охлаждаемые ионы фактически взаимодействуют не с облаком свободных электронов, а с маленькими ларморовскими кружочками, медленно движущимися вдоль магнитного поля [6]. Это резко усиливает теплообмен между горячими ионами и электронами. В интенсивных электронных пучках температура электронов ещё зависит от его плотности (см. формулу (3) ниже).

В результате было получено сверхбыстрое электронное охлаждение 65 МэВ-го протонного пучка со временем охлаждения менее 60 мс. Диаметр пучка снижался от нескольких см до 0,2 мм, а энергетический разброс электронов с  $2 \times 10^{-3}$  уменьшался до  $1,2 \times 10^{-6}$ .

#### 5. Создание диагностики охлаждённого пучка

Для диагностики сжатого протонного пучка пришлось разработать несколько видов специальных устройств. Наиболее полезным оказался ионизационный профилометр на основе тонкой струи паров магния, сканирующей поперечное сечение пучка протонов. Такой профилометр легко определял профиль протонного пучка, если его диаметр был много больше толщины струи паров магния — около 1 мм. Главное, в динамике можно было измерять плотность протонного пучка, по мере того как уменьшалась амплитуда колебаний протонов и они втягивались внутрь струи паров магния. При этом возрастал сигнал ионизации [12].

Для более сжатого пучка был разработан прибор, основанный на сканировании пучка пятимикронной нитью кварца. Для изготовления такой тонкой нити был использован метод, описанный в старой книге по экспериментальной физике. Конец кварцевого столбика расплавлялся в пламени стеклодувной горелки и выстреливался самодельным арбалетом в толстую дюралевую трубу. При полёте стекавший кварц формировал тонкую нить. Дюралевая труба, оклеенная внутри чёрным бархатом, разделялась вдоль её образующих на две половинки, а поблёскивающая на бархате кварцевая нить вынималась. Для сканирования использовалась дюралевая рамка, закреплённая на стальной струне. Нить закреплялась на свободных сторонах рамки. В нейтральном положении нить находилась в центре вакуумной камеры, но при включении двух электромагнитов, расположенных на противоположных сторонах вакуумной камеры, могла удерживаться одним из них в одном из двух крайних положений. При выключении магнита, удерживающего рамку, она пересекала протонный пучок и прилипла ко второму (включённому) магниту. Сигнал пролёта пучка фиксировался сцинтилляционными датчиками по прото-

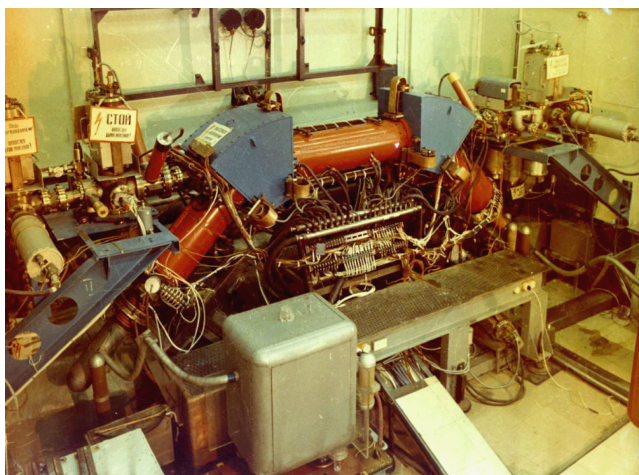


Рис. 2. Первая в мире система электронного охлаждения в накопительном кольце НАП-М, 1974 г.

нам, рассеянным на нити. При штатном пролёте струны гибло около 10 % протонного пучка, что позволяло многократно измерять профиль протонного пучка с постепенно уменьшающейся интенсивностью [12].

Для измерения энергетического разброса использовался Шоттки-пикап. В те времена в России не было чувствительных спектроанализаторов, и пришлось делать сверхчувствительный приёмник с двойным гетеродином. Сигнал с выхода подавался на АЦП и записывался в память ЭВМ. Пришлось разобраться с процедурой быстрого преобразования Фурье и написать программу к нашей машине [12]. Работала наша система не очень быстро, но позволяла перерабатывать сигналы,

накапливая сотни измерений для получения достаточно гладкого сигнала Шоттки охлаждённого пучка. В спектре мы увидели, что после охлаждения пространственный заряд существенно модифицировал Шоттки-спектр, а сигнал представлял собою две продольные волны, бегущие вдоль и против движения протонов [13, 15, 16]. Спектр Шоттки превращался в два пика вокруг частоты обращения протонов.

При дальнейших исследованиях обнаружилась возможность охлаждения вплоть до появления протонного пучка, упорядоченного в продольном направлении. Позднее это формирование кристаллических *ионных* пучков стало исследоваться на многих зарубежных синхротро-



Рис. 3. Малый штаб по исследованию слишком быстрого электронного охлаждения. Слева направо: аспирант В.В. Пархомчук, академик (с 1970 г.) А.Н. Скринский, к.ф.-м.н. И.Н. Мешков, заведующий лабораторией к.ф.-м.н. Н.С. Диканский.



Рис. 4. Академик (с 2016 г.) Василий Васильевич Пархомчук, академик (с 1970 г.) Александр Николаевич Скринский, академик (с 2019 г.) Игорь Николаевич Мешков, академик (с 2011 г.) Николай Сергеевич Диканский.

нах-накопителях, оборудованных СЭО ("electron solenoids"). Правда, получить надёжный *упорядоченный протонный пучок* долго не удавалось, пока в 2007 г. японо-российская команда (Университет Киото–ОИЯИ) не продемонстрировала упорядоченную структуру не хуже ионной [17].

Разработанное в ИЯФ электронное охлаждение стали называть "замагниченным русским".

## 6. Установка для измерения силы трения в однопролётном режиме

Результаты показались интересными, и было принято решение построить стенд с сильным магнитным полем для подробного изучения силы трения электронов пучка большой плотности. Стенд получил название МОСОЛ (*модель соленоида*) [14]. В данной установке протоны двигались в интенсивном электронном пучке, а эффекты пространственного заряда электронного пучка подавлялись сильным магнитным полем. Результаты, полученные на этом стенде, заложили основы создания новых СЭО в ИЯФ.

Стенд МОСОЛ имел электростатический ускоритель отрицательных ионов водорода с энергией около 1 МэВ, перезарядную мишень на парах магния, установленную перед трёхметровым соленоидом с электронным пучком, и на его выходе прецизионный спектрометр, обеспечивавший точное измерение энергии ионов.

Стенд был предназначен для детального изучения силы трения и влияния на неё различных факторов: отклонения по скорости от средней скорости электронов, плотности электронного пучка, роли значений и знака заряда ионов и величины магнитного поля. И большинство этих задач удалось выполнить.

Для исключения проблем с неоднородностью магнитного поля исследования проводились при малых энергиях электронов, т.е. на малых скоростях электронов и ионов. Особое внимание уделялось коррекции искажений магнитного поля. Это привело к тому, что поперечные скорости электронов, связанные с поперечными компонентами магнитного поля, оказались намного меньше эффективных скоростей электронов, которые с хорошей точностью совпадали с продольным разбросом их скоростей в электронном пучке.

Экспериментальные измерения продольной температуры электронов  $T_{\text{long}}$  показали, что она удовлетворительно описывается формулой (2.8) в препринте [14, с. 9]:

$$kT_{\text{long}} \approx \frac{(kT_{\text{cathode}})^2}{4eU_0} + 2e^2 n_e^{1/3}. \quad (3)$$

Первый обнаруженный новый эффект оказался очень впечатляющим: сила трения отрицательно заряженных ионов существенно превосходила силу трения положительно заряженных (рис. 5). Быстро поняли, что это вызвано кинематикой рассеяния электронов на ионах: отрицательно заряженные ионы отражают вперёд и назад вдоль магнитного поля электроны, находящиеся на малых прицельных параметрах, тогда как протоны их притягивают, заставляя ускоряться и проскальзывать вблизи протона без передачи энергии.

Экспериментально получена линейная зависимость максимальной силы трения от величины магнитного поля соленоида (рис. 6) для протонов и отрицательных ионов: имея равные значения при поле 1 кГс, максимальная сила трения для ионов отрицательной зарядности растёт с ростом поля в 2,5 раза быстрее, чем для протонов.

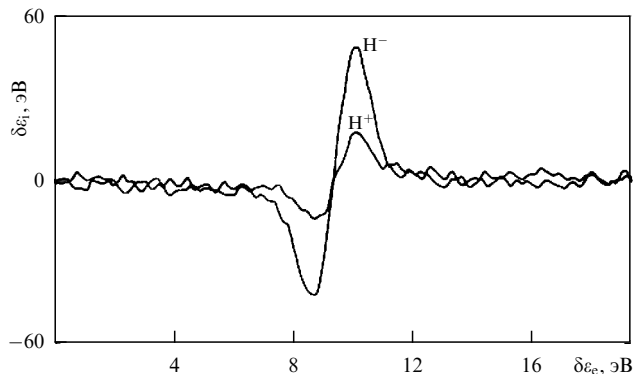


Рис. 5. Зависимость энергии ионов  $\text{H}^-$  и  $\text{H}^+$  от энергии электронов,  $B = 4$  кГс, ток электронного пучка равен 3 мА.

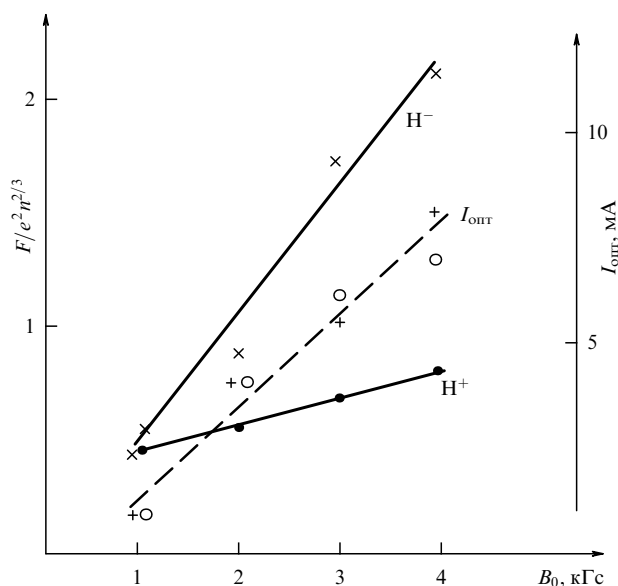


Рис. 6. Влияние магнитного поля на величину максимальной силы трения для ионов  $\text{H}^-$  (x) и протонов  $\text{H}^+$  (•);  $I_{\text{опт}}$  — оптимальное значение электронного тока (мА) при максимальной скорости охлаждения для ионов  $\text{H}^-$  (+) и  $\text{H}^+$  (o).

По результатам измерений с учётом значения магнитного поля и времени пролёта СЭО МОСОЛ была предложена эмпирическая формула:

$$F = - \frac{2\pi n_e e^4 Z^2 V}{m_e (V^2 + V_{\text{eff}}^2)^{3/2}} \ln \frac{\rho_{\text{max}} + \rho_L + \rho_{\text{min}}}{\rho_L + \rho_{\text{min}}}, \quad (4)$$

где  $V$  — скорость иона,  $Z$  — его заряд,  $n_e$  — плотность электронного пучка,  $m_e$  — масса электрона,  $V_{\text{eff}}$  — разброс скоростей электронов, связанный с продольным и поперечным движением электронов в магнитном поле соленоида и электрическом поле электронного пучка,  $\rho_{\text{max}}$  — максимальный прицельный параметр,  $\rho_L$  — ларморовский радиус вращения электронов в поле соленоида,  $\rho_{\text{min}} = Ze^2/V^2$  — минимальный прицельный параметр.

Как мы видели, отрицательные ионы охлаждаются заметно быстрее, и время охлаждения в таком электронном пучке порядка 7 мкс.

Необходимо отметить следующее. Температура сильно замагниченного электронного пучка настолько мала, что плазменная теория, которая является основой теории электронного охлаждения, не может быть использована

для описания такого холодного электронного пучка. Следовательно, построение точной теории электронного охлаждения для скоростей ионов  $V \leq [e^2 n_c^{1/3} / m_e]^{1/2}$  представляет собой большую проблему, не решённую до настоящего времени.

Более подробно установка МОСОЛ и эксперименты на ней описаны в препринте [15].

## 7. Загранице мы поможем

Вскоре после первых успешных экспериментов на НАП-М, результаты которых были представлены на Всесоюзных ускорительных конференциях 1974 и 1976 гг. с участием зарубежных коллег, у нас начались командировки в физические лаборатории Европы и США — нас приглашали выступить с докладами о методе электронного охлаждения и, главное, достигнутых экспериментальных результатах. Такие четыре семинара "досталось" провели И.Н. Мешкову в Швейцарии, в марте 1977 г. в ЦЕРН, и три в ФРГ — 24–25 сентября 1987 г. в GSI<sup>2</sup> и МРК<sup>3</sup>, и 1 ноября 1989 г. в Исследовательском центре Юлих<sup>4</sup>.

Эффект от этих семинаров был впечатляющий. В перечисленных и многих других лабораториях Европы, Японии и США начали строить Electron Coolers<sup>5</sup> (т.е. СЭО). Как рассказывал И.Н. Мешков, во второй поездке (1987 г.) по возвращении домой в Москве, в международном отделе АН СССР, молодая сотрудница, принимавшая его отчёт о командировке, спросила: "Вы ездили в ЦЕРН на стажировку?" — на что он без промедления ответил: "Нет, их стажировать!"

С 1979 по 1993 гг. было построено и запущено 11 СЭО.

После 1991 г. в РФ резко уменьшилось финансирование науки, и зарабатывание денег на иностранных контрактах для продолжения исследований стало необходимо.

Первый опыт такого контракта был получен Физико-технологическим Центром — филиалом ИЯФ (ФТЦ ИЯФ), организованным А.Н. Скринским и И.Н. Мешковым в г. Липецк. Кроме большой программы по внедрению ускорительной техники в металлургию и машиностроение ФТЦ выполнял фундаментальные исследования с применением ускорителей. В частности, были проведены два совместных эксперимента с Институтом прикладной геофизики им. Е.К. Фёдорова по исследованию ионосферной плазмы с помощью инъекции электронного пучка из пушки, запущенной на геодезической ракете. Параллельно, владея техникой конструирования и изготовления электронно-лучевых приборов, ФТЦ выполнил контракт с ЦЕРН, поставив электронную пушку и коллектор электронов на системе электронного охлаждения ионного синхротрона-накопителя Low Energy Antiproton Ring (LEAR). С этими устройствами electron cooler на LEAR заработал не хуже нашего СЭО ЭПОХА. Вскоре на LEAR провели первый физический эксперимент по измерению времени жизни ионов железа [18].

В тяжёлом 1993 г. мы вынужденно закрыли ФТЦ ИЯФ, выпустивший в тот год двух к.т.н. и двух ф.-м.н., одного д.ф.-м.н. и одного член-корреспондента РАН.

Одним из первых контрактов стало создание СЭО для синхротрона SIS-18 в GSI [19].

Электронное охлаждение в GSI начало активно развиваться сразу после его успешных испытаний в ИЯФ. Немецкий физик Маркус Штек (рис. 7, в центре над буквой G) посетил летом 1987 г. Новосибирск для детального изучения опыта, приобретённого ИЯФ. По возвращении в GSI он руководил созданием системы электронного охлаждения на экспериментальном накопительном кольце ESR<sup>6</sup>. Центр активно работал по развитию исследований с ускоренными тяжёлыми ионами. Когда интенсивности ионных пучков стало не хватать, было решено в основной ускоритель SIS-18 установить СЭО, заказанную в ИЯФ. Для нас накопление тяжёлых ионов было в новинку. Задача требовала сверхвысокого вакуума и нового для нас уровня вакуумной гигиены, но была очень интересной. И все наши сотрудники с энтузиазмом взялись за такую работу. На установке необходимо было использовать большое количество дюритовых шлангов для охлаждения секций соленоида. Мы выбрали самый чистый дюритовый шланг и сделали специальные зажимы для их уплотнения. А когда привезли СЭО в GSI, их рабочие ножом всё срезали и поставили гладкий радиационно стойкий немецкий шланг с немецкими зажимами на концах. Этот кулер до сих пор успешно накапливает пучки тяжёлых ионов [19].

Во время сборки СЭО китайские студенты, прикомандированные к GSI, активно фотографировали все детали. Маркус Штек в шутку сказал В.В. Пархомчуку: "Смотри, Василий, они всё сфотографируют и сами себе кулер сделают". На что последовал ответ: "Теперь-то мы знаем, как ещё лучше сделать кулер".

В 2000 г. в ИЯФ приехала большая делегация из Китая во главе с директором Института современной физики<sup>7</sup> в городе Ланчжоу для выработки договора об участии ИЯФ в развитии исследований с тяжёлыми ионами в IMP. Договор включал не только два кулера для накопителей CSRm и CSRe (рис. 8) [20], но и источник поляризованных атомов водорода. В новых СЭО соленоиды изготавливались из катушек, подстраиваемых по осям (рис. 9), а электронная пушка могла создавать электронный пучок с плотностью, уменьшенной на его оси, для подавления рекомбинации с накопленным ионным пучком.

В такой пушке (рис. 10) можно формировать практически трубчатый электронный пучок для уменьшения рекомбинации электронов с накопленными ионами. Кроме того, четыре независимых сектора управляющего электрода позволяли в электронном пучке модулировать его части независимо. Тогда можно видеть, как выбранная часть пучка движется вдоль трёх остальных частей. Это позволяло наблюдать вращение электронного пучка под действием его пространственного заряда. Накопленные ионы остаточного газа также влияли на движение пучка, компенсируя пространственный заряд. Такая электронная пушка впервые появилась на СЭО для синхротрона COSY (см. рис. 10).

Взаимодействие ЦЕРН и ИЯФ началось с работ ФТЦ по изготовлению электронной пушки и коллектора для LEAR (см. выше). Изучив опыт работы СЭО ИЯФ в Германии и Китае, в ЦЕРН решили заказать новую систему электронного охлаждения для модернизации антипротонного кольца LEAR в ионный накопитель LEIR (Low Energy Ion Ring) (рис. 11, 12). Особенно их привлекал сверхвысокий вакуум в нашем СЭО из-за электро-

<sup>2</sup> Gesellschaft für Schwere Ionen forschung (Darmstadt) — Общество исследования тяжёлых ионов (Дармштадт).

<sup>3</sup> Max-Planck-Institut für Kernphysik (Heidelberg) — Институт ядерной физики Макса Планка (Гейдельберг).

<sup>4</sup> Forschungszentrum Jülich GmbH — Исследовательский центр Юлих (общество с ограниченной ответственностью).

<sup>5</sup> Electron cooler — электронный охладитель, холодильник.

<sup>6</sup> Experimental Storage Ring.

<sup>7</sup> Institute of Modern Physics (IMP).



**Рис. 7.** Приём СЭО для SIS-18, 1998 г. Лаборатория GSI, Дармштадт, Германия. В.Н. Казаков, С.Н. Бочаров, Б.М. Смирнов, В.В. Пархомчук, П. Шпадке (P. Spadtke), М. Штек (M. Steck), Б.Х. Вольф (B.H. Wolf), Б. Францке (B. Franzke), Н. Ангерт (N. Angert).



**Рис. 8.** Директор Института современной физики Венлонг Жан (Wenlong Zhan) и В.В. Пархомчук на фоне установки СЭО 300 кэВ для накопителя CSRe, г. Ланчжоу, Китай, 2000 г.



Рис. 9. Система настройки положения осей магнитных катушек для достижения прямолинейности магнитного поля на уровне лучше  $10^{-5}$ .

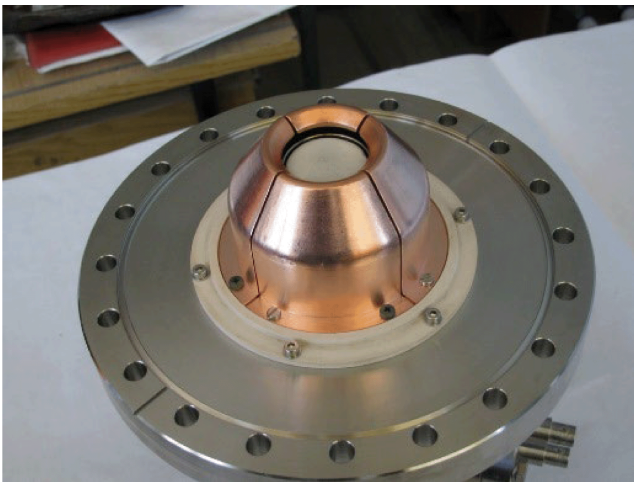


Рис. 10. Электронная пушка с четырьмя независимыми секторами для модуляции локальной интенсивности электронного пучка COSY.

статических поворотов в тороидальной части магнитной системы. Эти пластины позволяли получить захват в коллектор электронов, рассеяных из него после их отражения от пушки, что уменьшало относительные потери при рекуперации с  $2 \times 10^{-3}$  до менее  $10^{-6}$  с соответствующим улучшением вакуума благодаря подавлению десорбции. С 2005 г. LEIR успешно обеспечивает высококачественные пучки ионов [21] для коллайдера LHC.

Следующей большой работой было создание *высоковольтного кулера* для синхротрона COSY в Исследовательском центре в городе Юлих (ФРГ). Главная проблема этой задачи была связана с заданной энергией электронов СЭО COSY до 1,5 МэВ (рис. 13, 14).

Секция охлаждения была выполнена в традиционном стиле, но из-за высокого напряжения электронная пушка и коллектор помещались на высоковольтной колонне в герметичном сосуде, заполненном элегазом SF<sub>6</sub>. Транспортировка электронного пучка к секции охлаждения и его возвращение в коллектор выполнялось соленоидной магнитной системой с корректорами поперечных магнитных и электростатических полей [22]. Начиная с 2015 г. СЭО COSY успешно работала на различных экспериментах, включая моделирование узлов проекта FAIR.

## 8. Десант из Новосибирска

Успеху СЭО COSY предшествовала история первого высоковольтного СЭО на синхротроне Recycler — накопителе антипротонов ускорительного комплекса Tevatron в лаборатории им. Ферми (Fermilab, США). Когда в конце 1980-х гг. появилась возможность свободного выезда за границу, многие советские учёные этим воспользовались. Одна из таких возможностей привела к образованию в Fermilab молодёжной группы физиков-ускорительщиков из ИЯФ им. Будкера, Новосибирск. Лидеры группы С.С. Нагайцев и В.А. Лебедев фактически определили задачи работы группы и осуществили их выполнение — создание СЭО для накопления антипротонов и формирования их сгустков, инжектируемых затем в коллайдер.



Рис. 11. Команда ИЯФ перед отправкой в ЦЕРН СЭО для LEIR, 2004 г. Нижний ряд: Н.А. Арджанов, А.Д. Гончаров; второй ряд: А.Н. Ломакин, В.М. Панасюк, Б.А. Скарбо, В.Б. Рева, А.В. Бублей, В.В. Пархомчук, Н.П. Запяткин; третий ряд: В.А. Востриков, В.М. Ельцов, Г.Н. Ежков.



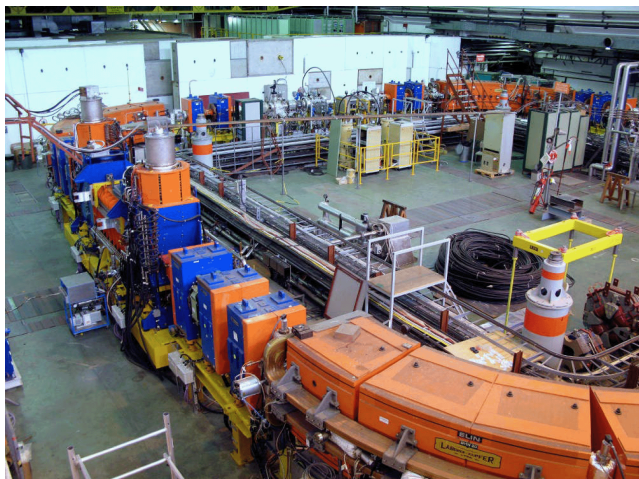


Рис. 12. СЭО в кольце LEIR (Low Energy Ion Ring — низкоэнергетическое ионное кольцо), 2005 г.

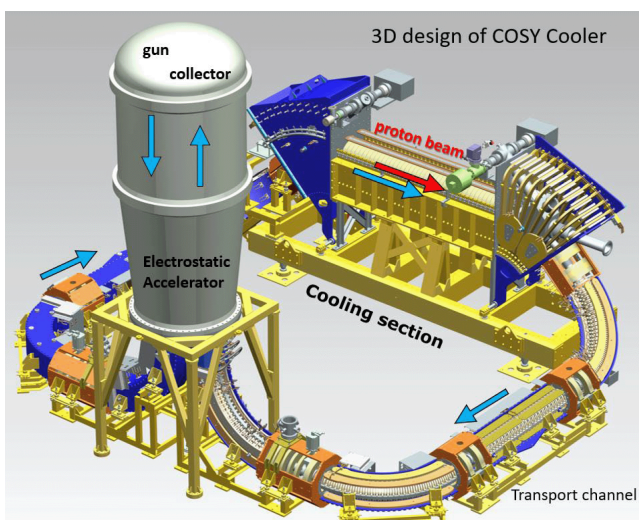


Рис. 13. СЭО для синхротрона COSY (COoler SYnchrotron — охлаждающий синхротрон), 2015 г. [22].

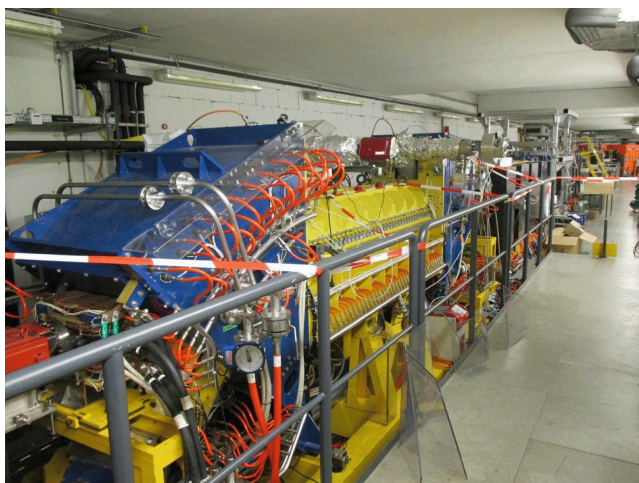


Рис. 14. Секция охлаждения в кольце синхротрона COSY.

Введение СЭО в эксплуатацию в 2006 г., примерно через 5 лет после начала второго сеанса (Run II), позволило улучшить скорость накопления антипрото-

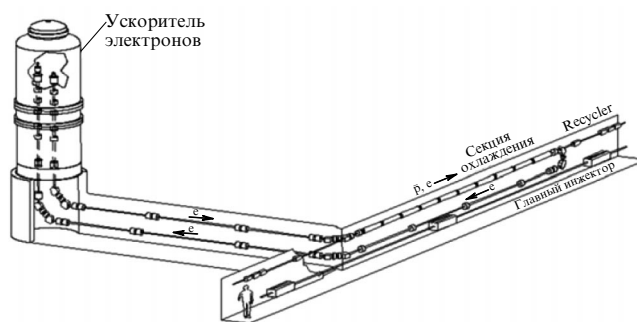


Рис. 15. Схема СЭО Fermilab [23].

нов и более чем вдвое увеличить среднюю светимость коллайдера.

СЭО Fermilab имела максимальную энергию электронов 4,2 МэВ, что позволяло охлаждать антипротоны с энергией 8 ГэВ (рис. 15). Эти значения энергий электронов и антипротонов превышают до сих пор более чем вдвое значения энергий всех существовавших ранее и работающих сегодня СЭО. Опыт СЭО Fermilab используется и сегодня группами ИЯФ им. Будкера и ОИЯИ.

## 9. Система электронного охлаждения ускорительного комплекса NICA

В Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна) с 2006 г. начались обсуждения проекта ионного коллайдера для экспериментальных исследований в области суперрелятивистской ядерной физики. Два года спустя, на конференции EPAC08 в Генуе, был представлен проект ускорительного комплекса "Nuclotron-based Ion Collider Facility (NICA) at JINR" [24]. Комплекс NICA включал в себя три синхротрона: Бустер, Нуклотрон и двухкольцевой Коллайдер<sup>8</sup>. И началась работа над проектом и изготовление оборудования.

Для достижения проектных параметров ускорительный комплекс оборудуется системами электронного и стохастического охлаждения. В частности, используются две СЭО: низковольтная система на энергию электронов до 50 кэВ в Бустере [24] и высоковольтная система до 2,5 МэВ в Коллайдере [25, 26].

Низковольтная СЭО (рис. 16) установлена на кольцо Бустера и запущена в эксплуатацию в 2018 г. Проведено несколько сеансов пусконаладочных работ Бустера NICA с использованием СЭО, и получено охлаждение пучков ионов  $^{56}\text{Fe}^{14+}$  и  $^{124}\text{Xe}^{28+}$  (рис. 17, 18).

Используя формулу (3) и полагая, что в основном движение электронов определяется дрейфовым вращением со скоростью  $V_l$  электронного пучка в сопутствующем магнитном поле  $B$ ,

$$V_l = c \frac{E_r}{B} = \frac{2\pi en_e a_e}{B}, \quad (5)$$

где  $E_r$  — радиальное поле пространственного заряда пучка,  $a_e$  — радиус поперечного сечения электронного пучка, можно получить величину минимального времени охлаждения 70 мс при магнитном поле, 750 Гс. Естественно, увеличивая продольное поле, можно увеличивать оптимальный ток и уменьшать время охлаждения.

<sup>8</sup> Названия "Бустер", "Нуклотрон" и "Коллайдер" написаны с заглавной буквы, так как это собственные имена.

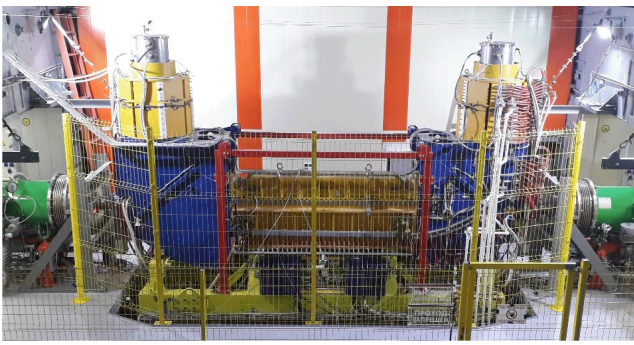


Рис. 16. СЭО Бустера NICA, установленная в прямолинейном промежутке синхротрона.

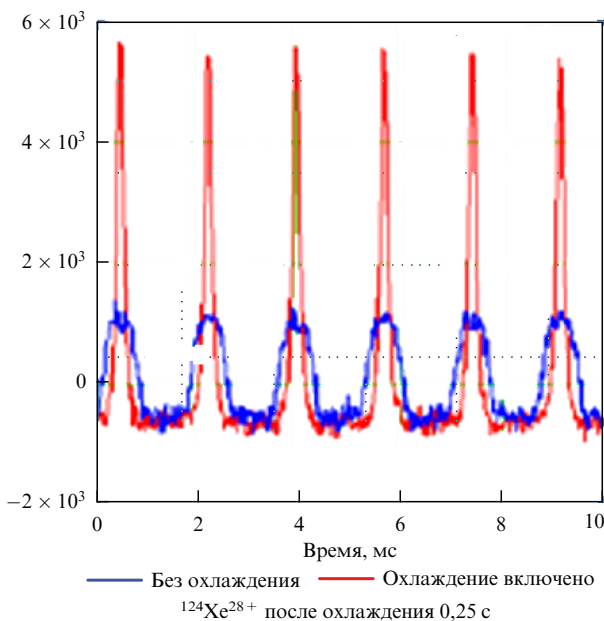


Рис. 17. Сгруппированный пучок ионов  $^{124}\text{Xe}^{28+}$  в Бустере NICA, измеренный с помощью FCT<sup>9</sup> до охлаждения и после охлаждения в течение 250 мс.

Конечно, при этом возрастает мощность, затрачиваемая на питание соленоида СЭО.

Электронное охлаждение для прямого использования в коллайдере требует создания высоковольтных систем примерно такого же типа, как для синхротрона COSY [22]. Высоковольтная СЭО Коллайдера NICA [25, 26] предназначена для обслуживания обоих колец и в данный момент находится в стадии начала монтажа на Коллайдере и завершения изготовления наиболее сложных её элементов. Система будет охлаждать пучки как во время накопления, так и непосредственно во время экспериментов. Поскольку необходимо охлаждать сразу два ионных пучка, движущихся навстречу друг другу, система содержит две секции охлаждения и состоит из двух практически независимых высоковольтных СЭО, каждая из которых, по аналогии с кулером синхротрона COSY, имеет свой бак с высоковольтной системой, транспортные каналы и секцию охлаждения. Практически все подсистемы СЭО, в том числе и все источники питания магнитов, также независимы.

<sup>9</sup> Fast Current Transformer (FCT) — быстрый трансформатор тока.

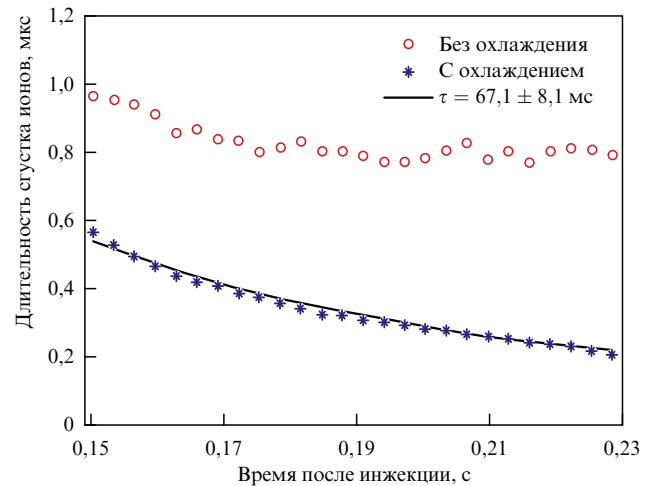


Рис. 18. Эволюция длительности ионных сгустков, также измеренная с помощью FCT при включённом ЭО и без него; получено время охлаждения менее 70 мс.



Рис. 19. СЭО Коллайдера имеет два участка охлаждения с электронными пучками, движущимися в прямолинейных секциях навстречу друг другу, для охлаждения ионных пучков в коллайдере NICA в верхнем и нижнем кольцах.

На начальном этапе разработки рассматривался вариант с одним электронным пучком, который, проходя секцию охлаждения первого кольца, охлаждает его ионный пучок, а затем, после разворота на  $180^\circ$ , попадает в секцию охлаждения второго кольца, где и охлаждает второй пучок. Однако такой подход имеет серьёзные и не только технические трудности: пока нет уверенности, что две СЭО, связанные общим электронным пучком, не внесут обратной связи ионных пучков. Поэтому было решено организовать два независимых электронных пучка.

Секции охлаждения двух СЭО расположены одна над другой и имеют длину около 6 м. Многие технические решения для этой СЭО были взяты из конструкции описанного выше высоковольтного охладителя COSY, однако часть решений потребовала серьёзных доработок, связанных с особенностями данной системы. В частности, была существенно переработана конструкция высо-

ковольтной системы и питающего её каскадного трансформатора, поскольку простое масштабирование высоковольтной системы охладителя COSY до напряжения 2,5 МВ не позволяло получить требуемые параметры. Кроме того, расстояние между встречными ионными пучками в секциях охлаждения задано конструкцией самого коллайдера и составляет всего 320 мм, что потребовало существенно изменить конструкцию секции охлаждения и отказаться от решения, опробованного в разработанных ранее СЭО ИЯФ [29].

## 10. Заключение

Электронное охлаждение широко используется в синхротронах-накопителях протонных и ионных пучков, заметно улучшая их параметры. В мире за 50 лет построено больше двух десятков систем электронного охлаждения. За это время в ИЯФ им. Г.И. Будкера выросло немало специалистов — талантливых инженеров и физиков — и наработан большой опыт создания и применения СЭО.

Авторы выражают свою благодарность всем участникам этого замечательного процесса.

## Список литературы

- Будкер Г И *Атомная энергия* **22** (5) 346 (1967); Budker G I *Sov. Atom. Energy* **22** 438 (1967)
- Куделайнен В И, Мешков И Н, Салимов Р А *ЖТФ* **41** 2294 (1971); Kudelainen V I, Meshkov I N, Salimov R A *Sov. Phys. Tech. Phys.* **16** 1821 (1972)
- Куделайнен В И и др. *ЖТФ* **46** 1678 (1976); Kudelainen V I et al. *Sov. Phys. Tech. Phys.* **21** 965 (1976)
- Гинкин В И и др. *Приборы и техника эксперимента* (6) 26 (1972)
- Skrinsky A N (VAPP-NAP Group) "Proton-antiproton colliding beams" (invited paper), in *8th Intern. Conf. on High-Energy Accelerators, HEACC 71, September 20–24, 1971, Geneva, Switzerland* (Geneva: CERN, 1971) pp.72–78
- Дербенев Я С, Скринский А Н *Физика плазмы* **4** 492 (1978); Derbenev Ya S, Skrinkii A N *Sov. J. Plasma Phys.* **4** 273 (1978)
- Куделайнен В И, Мешков И Н, Салимов Р А, Препринт № 72 (Новосибирск: Ин-т ядерной физики СО АН СССР, 1970)
- Будкер Г И и др. "Первые эксперименты по электронному охлаждению", в сб. *Труды Четвертого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва, 18–20 ноября 1974 г. Т. 2* (М.: Наука, 1975) с. 309
- Budker G I et al. *Particle Accelerators* **7** (4) 197 (1976)
- Будкер Г И и др. "Новые результаты исследований по электронному охлаждению", в сб. *Труды Пятого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 5–7 октября 1976* (М.: Наука, 1977) с. 236
- Будкер Г И и др. "Состояние работ по электронному охлаждению", в сб. *Труды X Международной конф. по ускорителям заряженных частиц высоких энергий, Протвино, июль 1977* Т. 1 (Серпухов, 1977) с. 498
- Пархомчук В В "История создания электронного охлаждения" *Наука из первых рук* (4(46)) (2012); <https://scfh.ru/papers/istoriya-sozdaniya-elektronnogo-okhlazhdeniya/>; <https://cyberleninka.ru/article/n/istoriya-sozdaniya-elektronnogo-okhlazhdeniya/viewer>
- Будкер Г И и др. "Метод электронного охлаждения в ускорителях и накопителях заряженных частиц", в сб. *Фундаментальные исследования. Физико-математические и технические науки* (Новосибирск: Наука, 1977) с. 104
- Диканский Н С и др. "Предельные возможности электронного охлаждения", Препринт № 88-61 (Новосибирск: Ин-т ядерной физики СО АН СССР, 1988)
- Дементьев Е И и др. *ЖТФ* **50** 1717 (1980); Dement'ev E I et al. *Sov. Phys. Tech. Phys.* **25** 1001 (1980)
- Пархомчук В В, Пестриков Д В *ЖТФ* **50** 1411 (1980); Parkhomchuk V V, Pestrikov D V *Sov. Phys. Tech. Phys.* **25** 818 (1980)
- Shirai T et al. *Phys. Rev. Lett.* **98** 204801 (2007)
- Baird S et al. *Phys. Lett. B* **361** 184 (1995)
- Steck M et al. "Electron cooling assisted beam accumulation in the heavy ion synchrotron SIS by repeated multiturn injection", in *Proc. of the 1999 Particle Accelerator Conf., New York, 1999*, p. 1704–1706
- Buble A et al. "The electron gun with variable beam profile for optimization of electron cooling", in *Proc. of EPAC 2002, Paris, France*, pp. 1356–1358
- Tranquille G et al. "LEIR electron cooler status", LHC Project Report 944 (Geneva: CERN, 2006); presented at *EPAC'06, Edinburgh, UK, June 26–30, 2006*
- Reva V B, Bryzgunov M I, Parkhomchuk V V, Halama A, Kamerzhiev V, Niedermayer P "COSY experience of electron cooling", in *12th Workshop on Beam Cooling and Related Topics, COOL2019, Novosibirsk, Russia, 2019* <https://doi.org/10.18429/JACoW-COOL2019-MOX01>
- Lebedev V, Shiltsev V (Eds) *Accelerator Physics at the Tevatron Collider* (Particle Acceleration and Detection) (New York: Springer, 2014) <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0885-1>
- Trubnikov G V et al. "Project of the Nuclotron-based Ion Collider fAcility (NICA) at JINR", in *Proc. of the 11th European Conf., EPAC 2008, Genoa, Italy, June 23–27, 2008; Conf. Proc. C* 0806233 (2008)
- Пархомчук В В, Рева В Б *Письма в ЭЧАЯ* **13** 1412 (2016); Parkhomchuk V V, Reva V B *Phys. Part. Nucl. Lett.* **13** 907 (2016)
- Батраков А М, Брызгунов М И, Гончаров А Д, Гусев И А, Жариков А А, Пархомчук В В, Рева В Б, Сеньков Д В *Письма в ЭЧАЯ* **21** 199 (2024); Batrakov A M, Bryzgunov M I, Goncharov A D, Gusev I A, Zharikov A A, Parkhomchuk V V, Reva V B, Senkov D V *Phys. Part. Nucl. Lett.* **21** 170 (2024)
- Пархомчук В В, Брызгунов М И, Бублей А В, Гончаров А Д, Денисов А П, Кремнев Н С, Полухин В А, Путьмаков А А, Рева В Б, Скоробогатов Д Н *Письма ЭЧАЯ* **15** 731 (2018); Parkhomchuk V V, Bryzgunov M I, Buble A V, Goncharov A D, Denisov A P, Kremnev N S, Polukhin V A, Putmakov A A, Reva V B, Skorobogatov D N *Phys. Part. Nucl. Lett.* **15** 793 (2018)

## Half a century of electron cooling development at BINP SB RAS

M.I. Bryzgunov<sup>(1,a)</sup>, A.V. Buble<sup>(1)</sup>, N.S. Dikansky<sup>(1,b)</sup>, N.S. Kremnev<sup>(1)</sup>, V.A. Lebedev<sup>(1,c)</sup>, I.N. Meshkov<sup>(2)</sup>, A.N. Skrinky<sup>(1,d)</sup>, B.N. Sukhina<sup>(1)</sup>, V.V. Parkhomchuk<sup>(1,e)</sup>, D.V. Pestrikov<sup>(1)</sup>, V.B. Reva<sup>(1,f)</sup>

<sup>(1)</sup> Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, prosp. Akademika Lavrenteva 11, 630090 Novosibirsk, Russian Federation

<sup>(2)</sup> Joint Institute for Nuclear Research, ul. Joliot-Curie 6, 141980 Dubna, Moscow Region, Russian Federation

E-mail: <sup>(a)</sup> M.I.Bryzgunov@inp.nsk.su, <sup>(b)</sup> dikansky@inp.nsk.su, <sup>(c)</sup> valebedev@jinr.ru,

<sup>(d)</sup> A.N.Skrinsky@inp.nsk.su, <sup>(e)</sup> parkhomchuk@inp.nsk.su, <sup>(f)</sup> V.B.Reva@inp.nsk.su

We outline the history of the method of forming ion beams by interaction with an electron beam. The method of forming this beam and the features of its application are called 'electron cooling.' Described is the development of this method from the initial idea presented by its author, the first director of the Institute of Nuclear Physics (INP) in Novosibirsk G I Budker, to its implementation and dissemination in accelerator laboratories worldwide.

**Keywords:** antiproton storage rings, electron cooling (EC), electron guns, resonant optics, collectors, recuperation, solenoids, electron cooling system (ECS), magnets, electron magnetization, proton lifetime, particle temperature

PACS numbers: 29.20.db, 29.27.Bd

Bibliography — 27 references

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **195** (1) 101–111 (2025)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.09.039750>

Received 19 August 2024

*Physics – Uspekhi* **68** (1) (2025)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2024.09.039750>