

## Статус накопителя электронов СИБИРЬ-2 – специализированного источника СИ

Э.И. Горникер, А.С. Калинин, В.Н. Корчуганов,  
Г.Н. Кулипанов, Г.Я. Куркин, Е.Б. Левичев,  
Ю.Г. Матвеев, В.В. Сажаяев, В.А. Ушаков, А.В. Филипченко.  
*ИЯФ СО РАН им. Буджера, Новосибирск, Россия*  
А.Г. Валентинов, А.В. Забелин, А.А. Кадников, Ю.В. Крылов, Д.Г. Одинцов,  
С.Г. Пестерев, Станкевич В.Г., Ушков В.Л., Юпинов Ю.Л.  
*РНЦ "Курчатовский Институт", Москва, Россия*

### Введение

В конце 1994 г. ИЯФ СО РАН (г.Новосибирск) закончил монтаж комплекса источников СИ в РНЦ "Курчатовский институт" (г.Москва) ( $\lambda \simeq 0.1 \div 2000 \text{ \AA}$ ) [1] и совместно с сотрудниками РНЦ КИ, приступил к его запуску [5].

В состав комплекса входят: специализированный накопитель электронов Сибирь-2 ( $E = 2.5 \text{ ГэВ}$ ) и накопитель Сибирь-1 ( $E = 0.45 \text{ ГэВ}$ ). Инжекционная часть включает линейный ускоритель ( $E = 80 \text{ МэВ}$ ) [2], [3] и каналы транспортировки электронных пучков ЭОК-1 и ЭОК-2. В настоящее время линак инжектирует 75-80 МэВ электронный пучок в накопитель Сибирь-1 с частотой повторения 1 Гц, током в импульсе 65 мА, энергетическим разбросом 1 %, длительностью 18 нс и эмиттансом 0.03 мрад-см. Ток разового захвата при инжекции в Сибирь-1 достигает 30 мА на равновесной орбите.

Хронология запуска комплекса выглядит следующим образом: Апрель 16, 1995 — захват электронов с энергией 350 МэВ в Сибирь-2 с включенным ВЧ-напряжением на резонаторе; Июнь 18, 1995 — инжекция на энергии 450 МэВ, ускорение пучка в Сибири-2 до 550 МэВ; Март 1996 — получен ускоренный пучок на проектной энергии 2,5 ГэВ; Апрель 15, 1996 — накопление электронов в одну сепаратрису в Сибири-2; Май-июнь 1996 — достигнут коэффициент захвата в ВЧ  $k = 0,93$ , проведены первые эксперименты по экспонированию "толстого" (300 - 500 мкм) рентгенорезиста для LIGA-технологии.

### Накопитель электронов Сибирь-1

Сибирь-1 является бустером для Сибири-2 [6] с параметрами:  $E = 450 \text{ МэВ}$ , один сгусток с током 100 – 200 мА и продольным размером  $\sigma_s = 30 \text{ см}$ . Кроме этого, Сибирь-1 является источником СИ ( $\lambda_c = 61,3 \text{ \AA}$  из поворотных магнитов). В настоящее время на Сибири-1 установлены три канала СИ.

Периодичность выпуска из Сибири-1 составляет в среднем 35 секунд с током 100–140 мА. Время жизни пучка при  $E = 450 \text{ МэВ}$  и  $I = 100 \text{ мА}$  составляет 2000 сек и определяется давлением остаточных газов. Горизонтальный эмиттанс пучка  $\varepsilon_x = 8,6 \times 10^{-7} \text{ м-рад}$ , энергетический разброс  $\sigma_E/E = 4,0 \times 10^{-4}$ .

## Накопитель электронов Сибирь-2

Магнитная структура Сибири-2 с периметром 124,13 м оптимизирована для получения электронного пучка с малыми эмиттансом ( $\varepsilon_x = 7.8 \times 10^{-8}$  м-рад) и состоит из шести зеркально-симметричных ячеек. Основные параметры Сибири-2 приведены в работе [7].

В 1995 г. работы с пучком в Сибири-2 были начаты с проектной магнитной системой и включенными хроматическими секступолями. Эффективность инжекции была около 6%. Частота обращения  $f_0 = 2,41541$  МГц при расчетных 2,41519 МГц. Измеренный диапазон жизни пучка по  $f_0$ , не превышал 100 Гц. Измеренные бетатронные частоты  $\nu_x = 7,573$ ,  $\nu_y = 7,376$  оказались далеки от расчетных значений  $\nu_x = 7,731$ ,  $\nu_y = 7,745$ , искажение равновесной орбиты было  $\Delta_{x,y} \geq 10$  мм, а хроматизм  $\xi_x = -5,4$ ,  $\xi_y = 8,2$ .

Настройка частот проводилась двумя семействами квадрупольей в бездисперсионных промежутках. При частотах  $\nu_x = 7.685$ ,  $\nu_y = 7.721$  эффективность инжекции увеличилась до 15 %, частота обращения сдвинулась в сторону проектного значения, а  $\Delta f_0 = 800$  Гц, что соответствовало имеющейся геометрической апертуре 3,2 см в промежутках с ненулевой дисперсией. Натуральный хроматизм был скомпенсирован до  $\xi_x = -0,2$ ,  $\xi_y = -0,58$ .

Измерения динамической апертуры, которые проводились с помощью возбуждения когерентных колебаний сгустка за один пролет, показали, что первоначально ДА по  $x$  не превышала  $\pm 7$  мм, что соответствовало акцептансу  $A_x = 4.0 \times 10^{-4}$  см-рад. Такой акцептанс был явно мал при эмиттансе инжектируемого пучка  $\varepsilon_x = 0.86 \times 10^{-4}$  см-рад и имевшихся ошибках нацеливания и согласования пучка.

С целью предотвращения увеличения эмиттанса инжектируемого пучка в нелинейных полях на начальном участке траектории в вакуумной камере Сибири-2, которая проходила с большим смещением от равновесной орбиты в краевых полях секступольной и квадрупольной линз, септум-магнит был приближен к равновесной орбите на 10 мм. Это привело к увеличению эффективности захвата до 30 %, но накопление в одну сепаратрису отсутствовало.

Поэтому в апреле 1996 г. мы перешли к так называемой "мягкой" структуре с частотами  $\nu_x = 7,773$ ,  $\nu_y = 6,701$  [4]. После непродолжительной настройки мы получили устойчивое накопление в одну сепаратрису. В настоящее время работа ведется при слабом положительном хроматизме кольца  $\xi_x = \xi_y = 0,72$ . Измерение ДА и амплитудных функций, проведенное для новой структуры на энергии инжекции 450 МэВ, дало для азимута септум-магнита  $A_x = 16,4$  мм,  $A_y = 8,4$  мм. Согласно этим измерениям горизонтальный акцептанс увеличился в пять раз и стал  $A_x = 2.17 \times 10^{-3}$  см-рад.

После установки новой структуры коэффициент разового захвата увеличился до 93 %. На рис.1 показана измеренная зависимость коэффициента разового захвата от частоты обращения пучка. Максимум совпадает с расчетным значением частоты обращения  $f_0 = 2.41519$  МГц.

На рис.2 показан процесс накопления тока. Видно как уменьшается время жизни накопленного пучка с ростом тока. Это уменьшение связано с одновременной порчей вакуума в накопителе под действием синхротронного излучения. Равновесие между потерями частиц вследствие ограниченной ДА, в процессе рассеяния на атомах оста-

точных газов и ростом тока наступает при токах 25-28 мА. Отметим, что накопление в несколько сгустков (до 10) также не позволило накопить ток больше 30 мА.

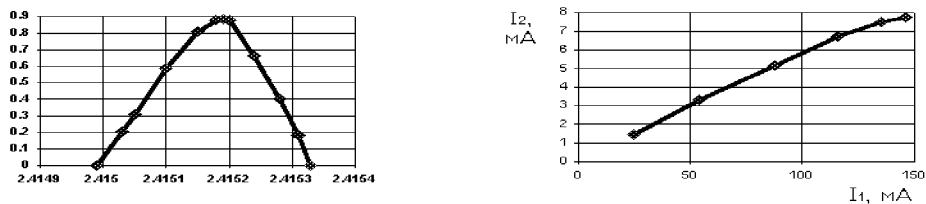


Рис. 1: Слева: зависимость коэффициента инжекции от частоты обращения в Сибири-2. Расчетное значение  $f_0 = 2,41519$  МГц. Справа: зависимость захватываемого тока в Сибири-2 от выпускаемого из Сибири-1.

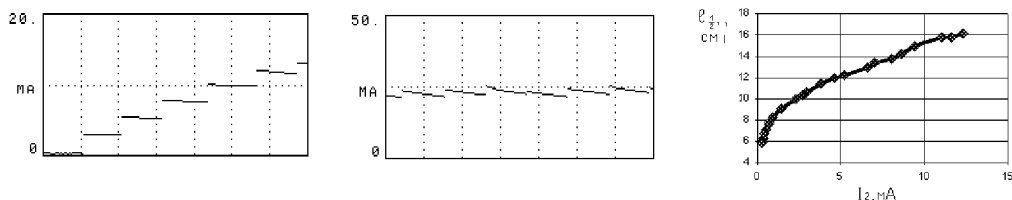


Рис. 2: Слева: процесс накопления тока в Сибири-2. В центре: насыщение в накоплении. Полная временная шкала 210 с. Справа: поведение продольного размера пучка от тока в сгустке.

Измерение продольного размера пучка осуществлялось при помощи диссектора с разрешением не хуже 1,2 см. На том же рис.2 (справа) показана экспериментальная зависимость продольного размера пучка на уровне  $1/2$  распределения плотности электронов в зависимости от тока в сгустке при  $E = 450$  МэВ и напряжении на резонаторе  $U_{rf} = 50$  кВ. Интерполяция этой кривой приводит к зависимости  $\sigma_s \propto I^{1/2.72}$ , похожей на закон удлинения сгустка  $\propto I^{1/3}$ , вызываемого турбулентной неустойчивостью.

Измеренная частота синхротронных колебаний уменьшается с ростом тока (0,84 мА - 9кГц; 5,1 мА - 8,75 кГц; 12,6 мА - 8,6 кГц), что указывает на наличие искажения потенциальной ямы ускоряющего напряжения за счет наведенного пучком напряжения на резонаторе. Измеренный продольный размер сгустка при  $I = 2$  мА,  $E = 2,5$  ГэВ и  $U_{rf} = 1,3$  МВ с учетом коэффициента пролета и разрешения диссектора равен  $\sigma_s = 3,96$  см. Соответствующая расчетная величина продольного стандартного размера по квантовым флуктуациям равна 3,73 см.

Измерение замкнутой орбиты осуществляется 24 пикапами, обеспечивающими точность смещения 0,1 мм. Точность выставки реперных знаков магнитных элементов относительно реперов геодезической сети в плане равна 0,14 мм, точность привязки элементов к геодезической сети не хуже 0,2 мм. Для коррекции использовался метод минимизации средних квадратов. Окончательно схема коррекции орбиты включает в себя 8 х-корректоров и 4 у-корректоров с максимальной силой 0,5 мрад.

Параметры скорректированной орбиты для x и y следующие: средние по кольцу (-0,36; 0,20 мм), среднеквадратичные по кольцу (1,0; 0,8 мм), максимальные отклонения (1,9; 1,5 мм). Результирующие максимальные отклонения на 2,5 ГэВ такие же, как на 450 МэВ.

Дисперсионные функции  $\eta_{x,y}$  вычислялись с точностью 2 см из измерения смещения орбиты при изменении частоты обращения. Расчетные и измеренные средние значения дисперсии на азимуте пикапа P1 внутри ахромата и в бездисперсионных промежутках на азимуте пикапа P2 совпадают с точностью 2 см. Бетатронные функции находились из измерений сдвигов частот бетатронных колебаний при малых изменениях в градиентах квадрупольных линз. Все измеренные значения примерно на 20 % меньше расчетных; этот факт есть следствие метода измерений и того, что рабочая точка находится вблизи резонанса связи. Коэффициент пространственного уплотнения орбит, найденный из измерений частот синхротронных колебаний при малых токах сгустка и на разных энергиях (450 МэВ и 2,5 ГэВ) великолепно совпадает с расчетным значением  $\alpha = 0,01$ .

Серьезная работа была проведена при подъеме энергии для уменьшения динамического рассогласования между полем магнитов и линз. Тем не менее избавиться полностью от сбросов пучка при подъеме энергии пока не удалось. По-видимому, сбросы возникают при пересечении резонанса  $2\nu_x + 2\nu_y = 29$ , которое мы плохо контролируем. В динамике возможны сдвиги частот от -0,01 до +0,03. Лучшим результатом явился подъем на энергию 2,5 ГэВ тока 10 мА из 17 мА в одном сгустке. Минимальное время подъема энергии в Сибири-2 составляет немного более 6 минут. На энергии 2,5 ГэВ время жизни при 5 мА — 1600 с. В настоящее время работает только один генератор и резонатор, что ограничивает возможный ускоренный ток величиной 50 мА.

### Планы

Сибирь-1: обезгаживание вакуумной камеры и увеличение времени жизни пучка на большом токе для экспериментов с СИ; увеличение частоты инжекционного цикла и выпускаемого тока до 200 мА; работы по ускорению настройки ВЧ-резонатора на Сибири-1 при подъеме энергии до 450 МэВ.

Сибирь-2: подключение второго резонатора; улучшение вакуумных условий в камере накопителя; продолжение работы по накоплению тока 100 мА во многих сгустках и подъем энергии с этим током до 2,5 ГэВ; получение максимального тока в одном сгустке.

### Список литературы

- [1] V.V. Anashin et al. NIM, A282, p.369-374 (1989).
- [2] G.V.Andreev. Zh.T.Ph., vol. 41, p.788-796, 1971.
- [3] V.Korchuganov et al. PAC-93, Washington,D.C., May 17-20, 1993. Vol.1.p.564-566.
- [4] V.Korchuganov et al. PAC-93, Washington,D.C., May 17-20, 1993. Vol.1.p.230-232.
- [5] V.Arbusov et al. ICSRS and AFSR-95, Kyongju, Korea, October 25-27, 1995, p.115-122.
- [6] В.В. Анашин и др. Труды 7 Всесоюзного совещания по физике заряженных частиц. Дубна, 1980, т.1, с.306.
- [7] В.В. Анашин и др. Труды 11 Всесоюзного совещания по физике заряженных частиц. Дубна, 1988, т.2, с.281-284.