

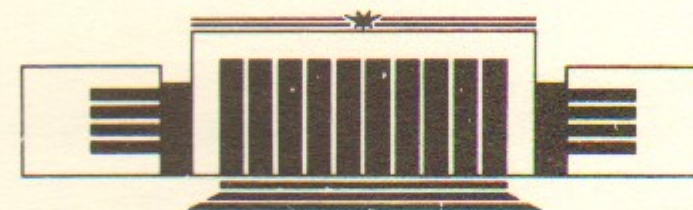


У
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

В.В. Анашин, Н.Г. Гаврилов, М.С. Гильденгорн,
Э.П. Коллеров, В.Н. Корчуганов, А.И. Никитин,
В.Н. Осипов, В.А. Роечко,
Э.М. Трахтенберг, Н.В. Фотин

**ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ИСТОЧНИКА
СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ —
НАКОПИТЕЛЯ «СИБИРЬ-2»**

ПРЕПРИНТ 88-109



НОВОСИБИРСК

Вакуумная система
специализированного источника
синхротронного излучения —
накопителя «Сибирь-2»

*В.В. Анашин, Н.Г. Гаврилов, М.С. Гильденгорн,
Э.П. Коллеров, В.Н. Корчуганов, А.И. Никитин,
В.Н. Осипов, В.А. Роевко,
Э.М. Трахтенберг, Н.В. Фотин*

Институт ядерной физики
630090, Новосибирск 90, СССР

АННОТАЦИЯ

В работе рассматриваются особенности конструкции вакуумной системы накопителя «Сибирь-2». Обсуждаются достоинства применения алюминиевых сплавов как основных конструкционных материалов высоковакуумных систем. Приведены результаты экспериментов по изучению стимулированной десорбции.

© Институт ядерной физики СО АН СССР

В настоящее время в ИЯФ СО АН СССР ведется создание специализированного источника синхротронного излучения — накопителя электронов «Сибирь-2» для ИАЭ им. И.В. Курчатова.

Накопитель электронов «Сибирь-2» [1], предназначен для генерирования сверхярких пучков электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн в инфракрасной, ультрафиолетовой и рентгеновской областях спектра. Использование синхротронного излучения революционным образом изменяет возможности многих физических методов исследования как в области фундаментальных наук (в частности, атомной и молекулярной физики, физики твердого тела, химического катализа, биологии), так и в области прикладных наук (материаловедение, микроэлементный анализ, медицинская диагностика и др.), а кроме того, открывает возможность реализации на его основе ряда принципиально новых технологий (например, технологии производства приборов микроэлектроники с субмикронными структурами).

Основные характеристики накопителя «Сибирь-2»

Максимальная энергия электронов	2.5 ГэВ
Максимальный накопленный ток:	
в одногустковом режиме	100 мА
в многоступенчатом режиме	500 мА
Спектральный диапазон синхротронного излучения	$0.1 \div 2 \cdot 10^3 \text{ \AA}$
Критическая энергия фотонов СИ	7 кэВ
Периметр	124.13 м
Радиус поворотных магнитов	4.906 м
Количество каналов вывода синхротронного излучения	39
Общая эффективная скорость откачки:	
магниторазрядных насосов	15000 л/с
титановых испарительных насосов	60000 л/с
Рабочий вакуум	$3 \cdot 10^{-9}$ Торр

1. ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА

Кольцо накопителя «Сибирь-2» (рис. 1) состоит из шести зеркально-симметричных суперпериодов, каждый из которых содержит по два прямолинейных промежутка длиной около 3 метров для установки ондуляторов, змеек, инжекции и резонаторов ВЧ-питания. Вакуумная система накопителя отделена от канала инжекции вакуумно-плотной бериллиевой фольгой толщиной около 100 мкм. Фольги из бериллия также разделяют накопитель и каналы вывода синхротронного излучения (СИ) из сверхпроводящих змеек. На всех остальных каналах вывода СИ для защиты вакуумной системы накопителя от прорыва атмосферы со стороны каналов установлены быстродействующие заслонки с малой вакуумной проводимостью (время срабатывания 0.02 с) и вакуум-

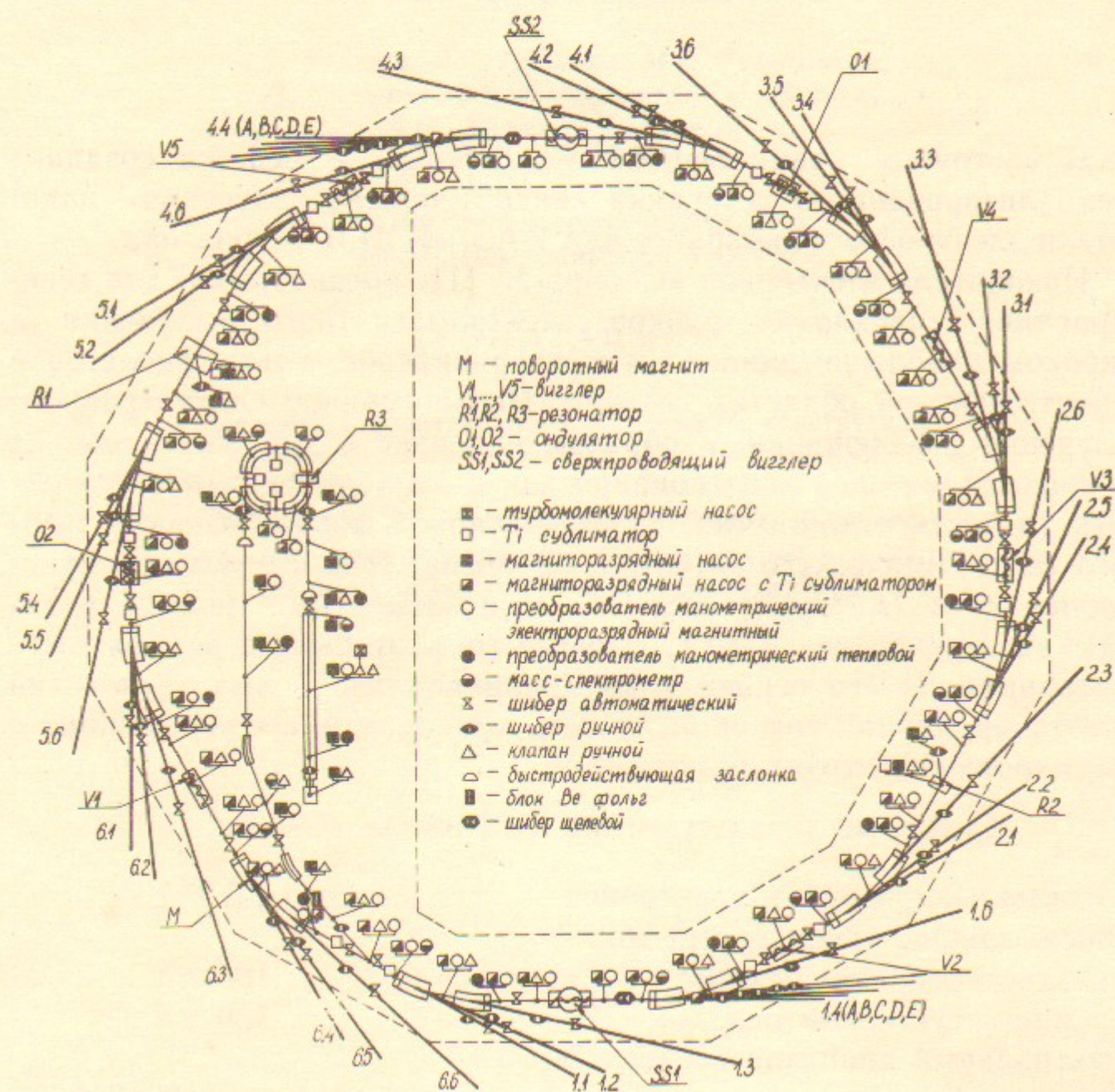


Рис. 1. Структурная схема вакуумной системы комплекса «Сибирь-2».

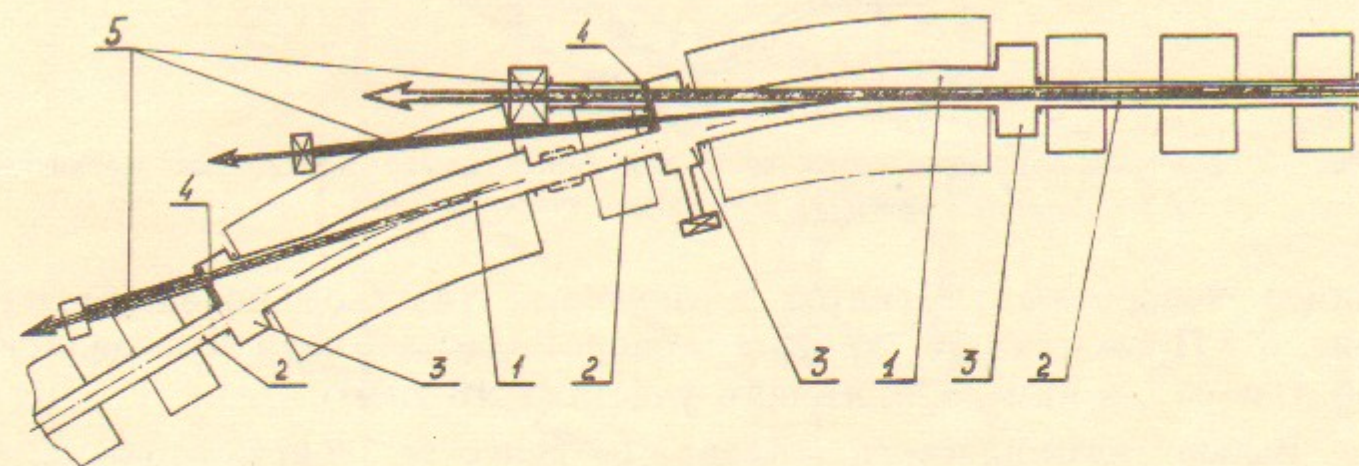


Рис. 2. Участок суперпериода накопителя «Сибирь-2»:
 1 — вакуумные камеры поворотных магнитов; 2 — вакуумные камеры линзовых участков;
 3 — блоки откачки и диагностики (БОД); 4 — приемники излучения; 5 — каналы вывода СИ.

но-плотные автоматические оперативные шиберы типа ЗПА, аналогичные описанным в [2] (время срабатывания 1 с), которые также срабатывают при повышении давления в канале выше установленного предела. Кроме того, для быстрой вакуумно-плотной изоляции отдельных участков вакуумной системы накопителя на кольце установлены 24 автоматических шиберов. Вакуумный тракт каждого суперпериода имеет постоянную структуру и одинаковое оборудование для откачки и диагностики. На рис. 2 изображена часть суперпериода.

1.1. Вакуумные камеры

Вакуумные камеры поворотных магнитов и линзовых участков изготавливаются из алюминиевого сплава АМцС [3] (в дальней-

шем просто алюминия) методом экструзии. Камера поворотного магнита имеет ширину около 200 мм, что позволяет выводить СИ практически без попадания излучения на стенки камеры. Профили

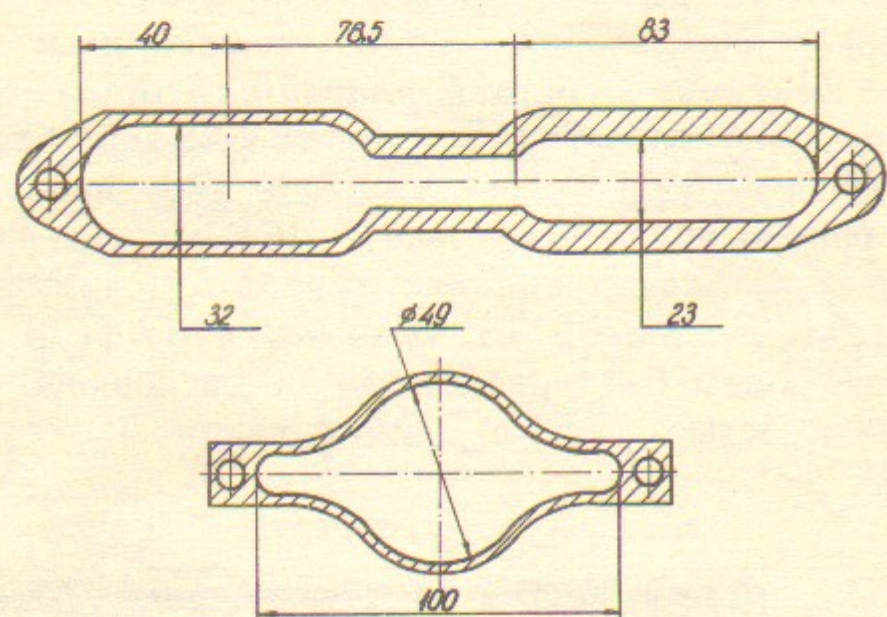


Рис. 3. Профили поперечного сечения вакуумных камер поворотных магнитов (вверху) и линзовых участков.

камер поворотных магнитов и линзовых участков показаны на рис. 3. Проводимость камеры поворотного магнита составляет $40 \text{ л} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-1}$, а камеры линзового участка — $15 \text{ л} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Выбор алюминиевого сплава в качестве конструкционного материала вакуумных камер обусловлен целым рядом его преимуществ по отношению к нержавеющей стали:

- Профили камер из алюминия, изготовленных методом экструзии, позволяют интегрировать приемник излучения с камерой и обеспечивают постоянные размеры поперечного сечения камер по всему периметру накопителя.
- Коэффициент теплопроводности алюминия в 8 раз выше, чем у нержавеющей стали. Следовательно, рассеяное СИ не будет вызывать локального перегрева вакуумных камер. Высокий коэффициент теплопроводности обеспечивает удобство прогрева при термическом обезгаживании камер.
- Алюминий имеет экстремально низкое значение коэффициента тепловой десорбции. После химической очистки и прогрева при температуре 180°C газовыделение алюминия составляет $4 \div 10 \cdot 10^{-14} \text{ л} \cdot \text{Торр} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. Для нержавеющей стали, химически очищенной и обезгаженной при температуре 450°C , газовыделение составляет $4 \cdot 10^{-13} \text{ л} \cdot \text{Торр} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$.

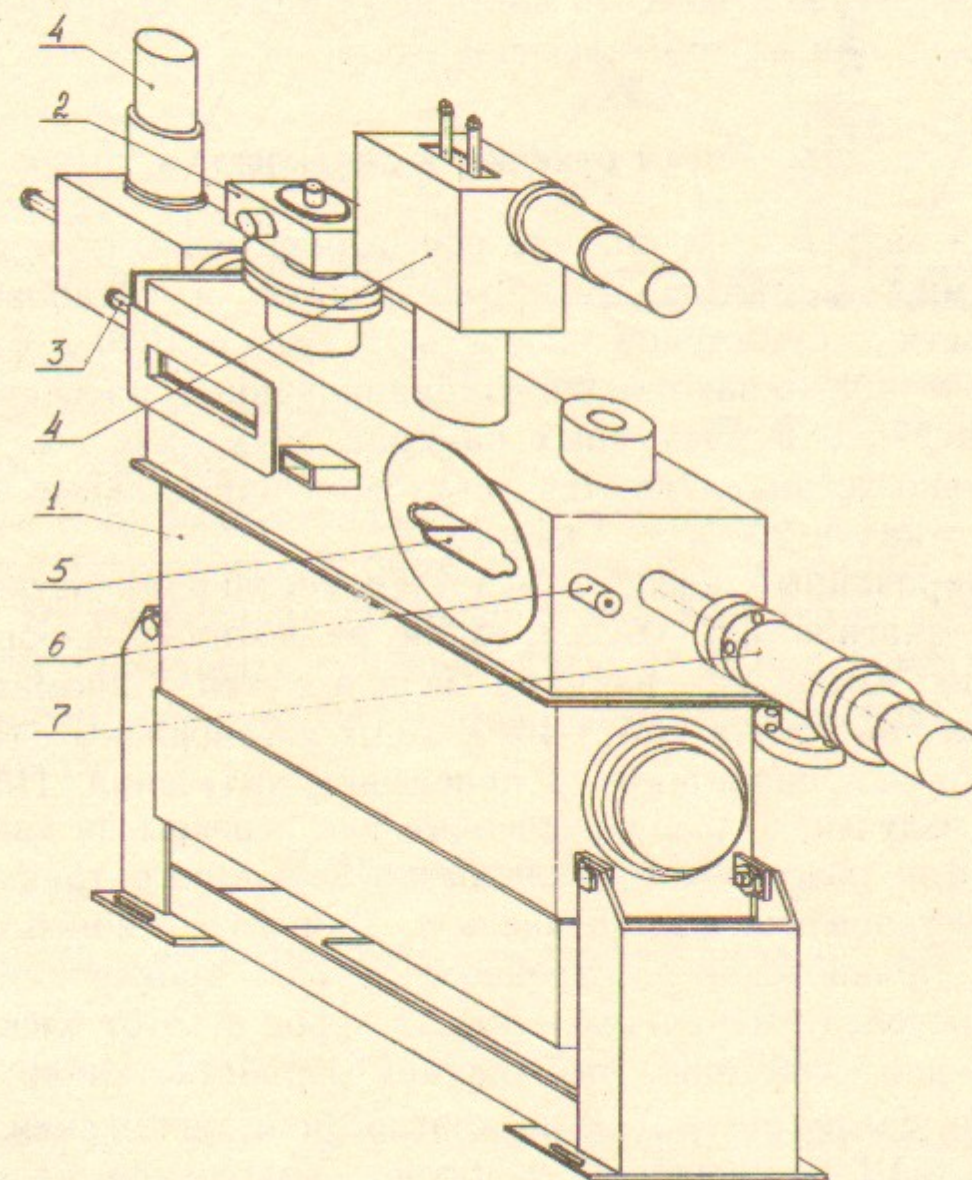


Рис. 4. Блок откачки и диагностики.

1 — комбинированный насос; 2 — манометрический преобразователь; 3 — неподвижный приемник излучения; 4 — подвижные приемники излучения; 5 — фальшпанель; 6 — электрод итоса ионов; 7 — клапан присоединения форвакуумной откачки.

- Алюминий имеет в 2—3 раза ниже коэффициент электронно-стимулированной десорбции при одинаковой набранной дозе облучения.
- В нашем случае стоимость вакуумных камер из алюминия намного ниже, чем из нержавеющей стали.

1.2. Блоки откачки и диагностики

Рабочий вакуум в накопителе обеспечивается комбинированными насосами, имеющими магниторазрядную и титаново-испарительные части с суммарной скоростью откачки $1000 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$. Всего на кольце устанавливаются 60 комбинированных насосов. В каждом суперпериоде в вакуумных камерах двух линзовых участков дополнительно устанавливаются титаново-испарительные насосы со скоростью откачки $200 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$ каждый.

Комбинированный насос 1 является составной частью блоков откачки и диагностики (БОД), один из которых изображен на рис. 4. Для измерения вакуума используется манометрический преобразователь 2 типа ПММ-46. В БОД установлены неподвижный 3 и два подвижных 4 приемника излучения. Подвижные приемники излучения, предназначенные для перекрытия каналов вывода СИ. Для обеспечения «гладкости» вакуумного тракта в каждом БОД установлена фальшпанель 5. Для отсоса ионов, образующихся при столкновении электронного пучка с молекулами остаточного газа, используется специальный электрод 6. Этот электрод также служит для зажигания разряда при обработке камер тлеющим разрядом в среде аргона. Для диагностики положения пучка в некоторых БОД установлены мониторы положения электронного пучка. Для определения спектра остаточного газа и поиска микротечей в вакуумной системе накопителя на части блоков откачки и диагностики установлены масс-спектрометры типа МХ-7304. Соединение алюминиевых камер с фланцами из нержавеющей стали БОД осуществляется с помощью биметаллических переходников 12X18Н10Т-АМцС. Данное соединение изображено на рис. 5. Листовой биметалл для переходников изготавливается методом горячей прокатки. Биметаллические переходники были испытаны на вакуумную герметичность. Испытания термоциклированием, термоударами и на ресурс проводились на 5 образцах.

1. Термоциклирование. Все 5 образцов в течение 1 часа нагревались в печи до температуры 300°C , выдерживались при данной температуре 3 часа и остывали со скоростью остывания печи до

комнатной температуры. Проверка на вакуумную герметичность осуществлялась после 1, 5 и 10 термоциклов. Вакуумные течи по биметаллу отсутствовали.

2. Термоудар. Испытания проводились на одном из образцов, который нагревался до температуры 300°C и погружался в холодную воду. Термоудар проводился 30 раз. Течи не обнаружены.

3. Ресурс. Все 5 образцов выдерживались в течение 100 часов при температуре 300°C .

Вакуумные течи по биметаллу отсутствовали.

Температура прогрева биметаллического переходника при термическом обезгаживании не более 200°C . Как видно из испытаний, даже в экстремальных температурных условиях биметаллический переход алюминий—нержавеющая сталь обеспечивает вакуумную герметичность.

1.3. Приемник излучения

Мощность синхротронного излучения можно определить по формуле:

$$P(\text{кВт}) = 88.5 \cdot E^4(\text{ГэВ}) \cdot I(\text{А}) / R(\text{м}), \quad (1)$$

где E — энергия, I — ток, R — радиус поворотных магнитов.

При энергии электронов 2,5 ГэВ и токе 0,5 А суммарная мощность СИ равна 352 кВт, или $1 \text{ кВт} \cdot \text{град}^{-1}$. Все приемники устанавливаются в БОД, т. е. непосредственно в местах откачки. Основная часть мощности СИ поглощается приемником излучения, установленным в месте вывода СИ из поворотного магнита (см. 4 на рис. 2). На данный приемник падает СИ с дуги 10° поворотного магнита, что соответствует мощности 500 Вт на сантиметр длины приемника. Конструкция приемника показана на рис. 6. Все приемники изготовлены из меди. Для увеличения облучаемой площади поверхность, принимающая СИ, расположена под углом 15° к медианной плоскости и, кроме того, на ней нарезаны треугольные зубья. Для увеличения теплоотвода в канале водяного охлаждения также нарезаны зубья. С целью снижения электронно-стимулированной десорбции со стенок БОД к приемнику крепится

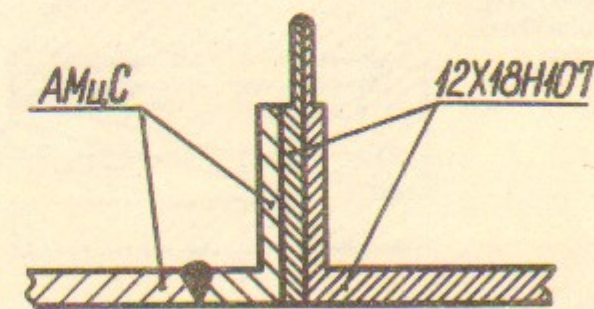
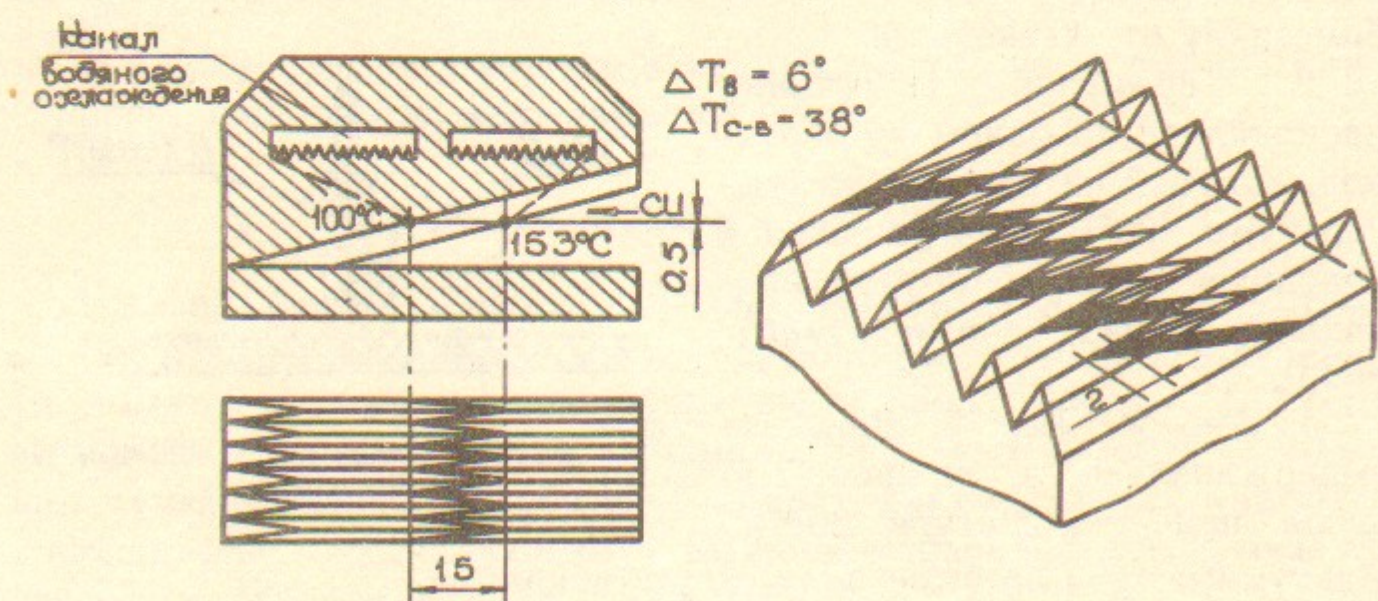


Рис. 5. Соединение через биметаллический переходник.

пластина, которая эффективно перехватывает вылетевшие из приемника электроны.



снимаемая мощность ~ 10 кВт
1 см длины приемника - 500 Вт

Рис. 6. Конструктивная схема приемника излучения.

Тепловой расчет приемника при падающей на него мощности 10 кВт ($500 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-1}$) и расходе воды $12 \text{ л} \cdot \text{мин}^{-1}$ показал, что максимальная температура 153°C будет на вершинах зубьев в местах падения СИ. Вода, проходящая через приемник, нагревается на 6°C . Перепад температур граничного слоя приемник — вода составляет 38°C .

Для охлаждения приемников излучения и алюминиевых вакуумных камер накопителя применяется дистиллированная вода. Вода, охлаждающая алюминиевые камеры, должна иметь кислотность $\text{pH} = 6$.

1.4. Каналы вывода СИ

1.4.1. Высоковакуумные каналы

Высоковакуумные каналы вывода СИ предназначены для транспортировки излучения от накопителя к экспериментальным станциям. Накопитель обеспечивает работу 29 высоковакуумных каналов.

Вакуумные элементы каналов изготовлены из нержавеющей стали. Для получения высокого вакуума каналы прогреваются до температуры $300 - 350^\circ\text{C}$. Специальные приемники излучения обес-

печивают экранировку стенок канала от СИ таким образом, что синхротронное излучение попадает только в рабочую зону. Для защиты вакуумной системы накопителя при ухудшении вакуума в каналах используются автоматические вакуумно-плотные шиберы типа ЗПА, работающие вместе с быстродействующими заслонками. В каждом канале установлен демпфер ударной волны, назначение которого — уменьшение скорости фронта ударной волны в случае прорыва атмосферы в канал. Расстановка по длине каналов магнитоэлектрических насосов и проводимость вакуумпроводов делают возможным эксплуатацию каналов при вакууме в накопителе 10^{-9} Торр и на выходе не хуже 10^{-6} Торр.

1.4.2. Каналы вывода СИ жесткого рентгеновского диапазона

Накопитель «Сибирь-2» имеет 10 каналов вывода СИ жесткого рентгеновского диапазона, предназначенных для транспортировки СИ из сверхпроводящих змеек через бериллиевые фольги, охлаждаемые водой, в экспериментальные станции. Каналы изготавливаются из нержавеющей стали и обезгаживаются прогревом при температуре $300 - 350^\circ\text{C}$.

2. СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПРОМЕЖУТКОВ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ

Эксперименты по получению высокого вакуума в вакуумных системах с камерами из алюминия проводились на стенде, показанном на рис. 7.

К блоку откачки из нержавеющей стали приваривалась алюминиевая камера длиной 1.5 м. При прогреве температура блока откачки не превышала 350°C , а алюминиевой камеры — $160 - 180^\circ\text{C}$.

Предельный вакуум равнялся $3 \cdot 10^{-11}$ Торр в блоке откачки и $2 \cdot 10^{-10}$ Торр на конце алюминиевой камеры. Спектр масс остаточного газа приведен на рис. 8.

Была проведена очистка алюминиевой камеры тлеющим разрядом в среде аргона при давлении $2 \cdot 10^{-2}$ Торр. Для зажигания разряда в блоке откачки установлен специальный электрод. Откачка аргона осуществлялась форвакуумным насосом через азотную ловушку. Средняя доза ионов $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Алюминиевая камера нагревается разрядом до $T \sim 150^\circ\text{C}$. С целью удаления аргона вакуумная система прогревалась в течение 24 часов. Предельный

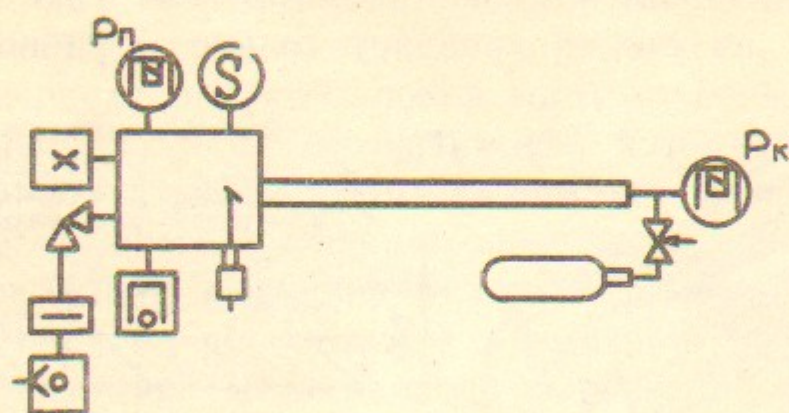


Рис. 7. Схема стенда для исследования участка камеры.

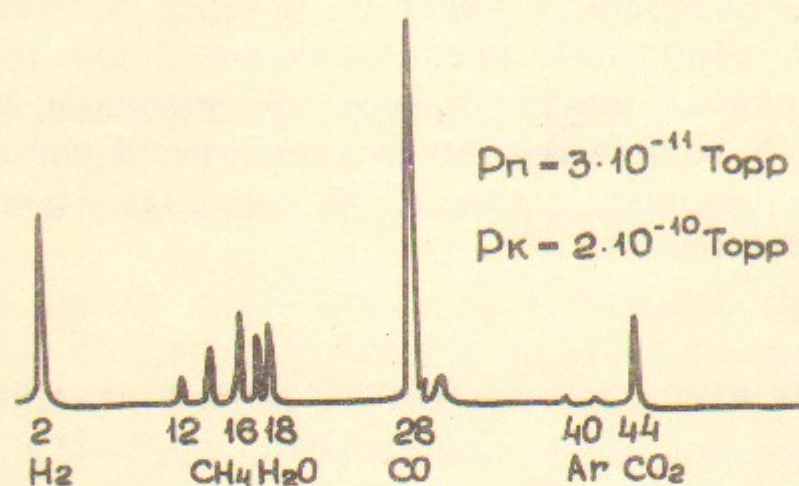


Рис. 8. Спектр масс остаточного газа до аргонной тренировки.

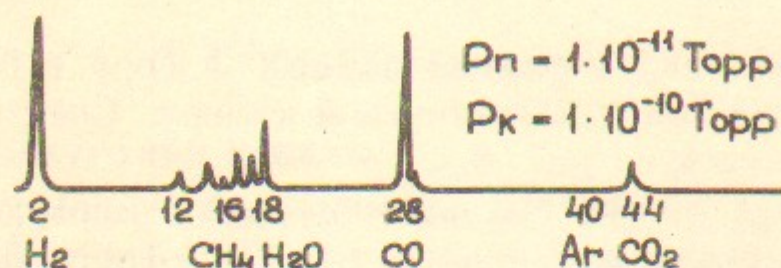


Рис. 9. Спектр масс остаточного газа после аргонной тренировки и прогрева.

вакуум равнялся $1 \cdot 10^{-11}$ Торр в блоке откачки и $1 \cdot 10^{-10}$ Торр на конце камеры. Спектр масс остаточного газа приведен на рис. 9.

3. ДЕСОРБЦИЯ ГАЗА

Основным видом газовой нагрузки в накопителе является интенсивная десорбция газа под действием СИ. Механизм газовой десорбции под действием СИ в современном представлении выглядит следующим образом. Фотоны, падающие на поверхность, выбивают фотоэлектроны, которые возвращаются к поверхности магнитным полем накопителя и выбивают молекулы газа, причем фотоэлектроны вызывают двухкратное десорбирующее действие, выбивая молекулы газа при вылете с поверхности и попадании на нее. В нашем случае газовыделение с приемников, установленных в БОД, — сосредоточенное, а в вакуумных камерах — распределенное.

Поток газовой десорбции можно определить по формуле

$$Q = \frac{2N_{\phi} k \alpha \chi m \eta}{3,5 \cdot 10^{19}} \quad (\text{л} \cdot \text{Торр} \cdot \text{с}^{-1}), \quad (2)$$

где N_{ϕ} — количество фотонов, образующихся в накопителе в единицу времени на один мрад угла поворота:

$$N_{\phi} = 1,28 \cdot 10^{17} E(\text{ЭВ}) \cdot I(\text{А}) \quad (\text{фотон} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{мрад}^{-1}); \quad (3)$$

k — коэффициент, учитывающий, что выбивание фотоэлектронов осуществляется фотонами с энергией более 10 эВ:

$$k \approx 1 - (\epsilon_0/\epsilon_c)^{1/3}, \quad (4)$$

что справедливо при $\epsilon_0/\epsilon_c \leq 0,001$, где $\epsilon_0 = 10$ эВ, ϵ_c — критическая энергия электронов ($\epsilon_c = 7000$ эВ); α — угол дуги поворотного магнита с которого падает излучение на приемник (камеру) (мрад); χ — квантовый выход фотоэлектронов при нормальном падении фотонов на поверхность: $\chi = 3,3 \cdot 10^{-2}$ (электрон · фотон⁻¹); m — коэффициент, учитывающий, что при скользящем падении фотонов квантовый выход возрастает (значение m можно определить из графика рис. 10 [4]); η — коэффициент электронно-стимулированной десорбции (молекул · электрон⁻¹), значение которого зависит, в основном, от степени заполнения поверхности молекулами газа.

Понятно, что лишь степень очистки поверхности (коэффициент электронно-стимулированной десорбции) определяет вакуум при работе с пучком, так как все остальные коэффициенты зависят от конструкции накопителя и режима его работы (E, I). Для получения рабочего вакуума в накопителе $3 \cdot 10^{-9}$ Торр необходимо снижение η до значений $10^{-5} \div 5 \cdot 10^{-6}$ (молекул \cdot электрон $^{-1}$), что может быть достигнуто при длительной работе накопителя с пучком или после обработки камер тлеющим разрядом в среде аргона на месте.

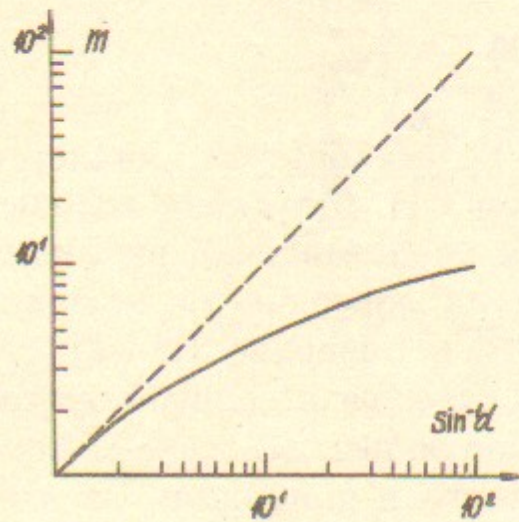


Рис. 10. Зависимость коэффициента квантового выхода фотоэлектронов от угла скольжения СИ для энергии накопителя 2.5 ГэВ.

На рис. 11 представлена зависимость коэффициента электронно-стимулированной десорбции от дозы электронной бомбардировки, снятая экспериментально в ИЯФ СО АН СССР для образцов из

алюминия и нержавеющей стали. Энергия электронов при бомбардировке была 200 эВ.

Аналогичные данные приведены также в [5].

Были сделаны оценки среднего вакуума в зависимости от различных интегральных доз (2, 10, 50 А \cdot час) работы накопителя при энергии 2.5 ГэВ и токе 0.5 А. На рис. 12 показано распределение давления остаточного газа в суперпериоде.

4. ВРЕМЯ ЖИЗНИ

В электронных накопителях основным процессом взаимодействия пучка с остаточным газом, ограничивающим время жизни, являются однократные акты тормозного излучения. Время жизни для i -го компонента остаточного газа можно определить по формуле

$$\tau_i = 2.12 \cdot 10^{-8} X_i / M_i P_i \quad (\text{час}), \quad (5)$$

где X_i — радиационная единица длины ($\text{г}/\text{см}^2$); P_i — парциальное давление (Торр); M_i — молекулярная масса (у. е.) для i -го компонента остаточного газа. Уравнение для определения эффективного

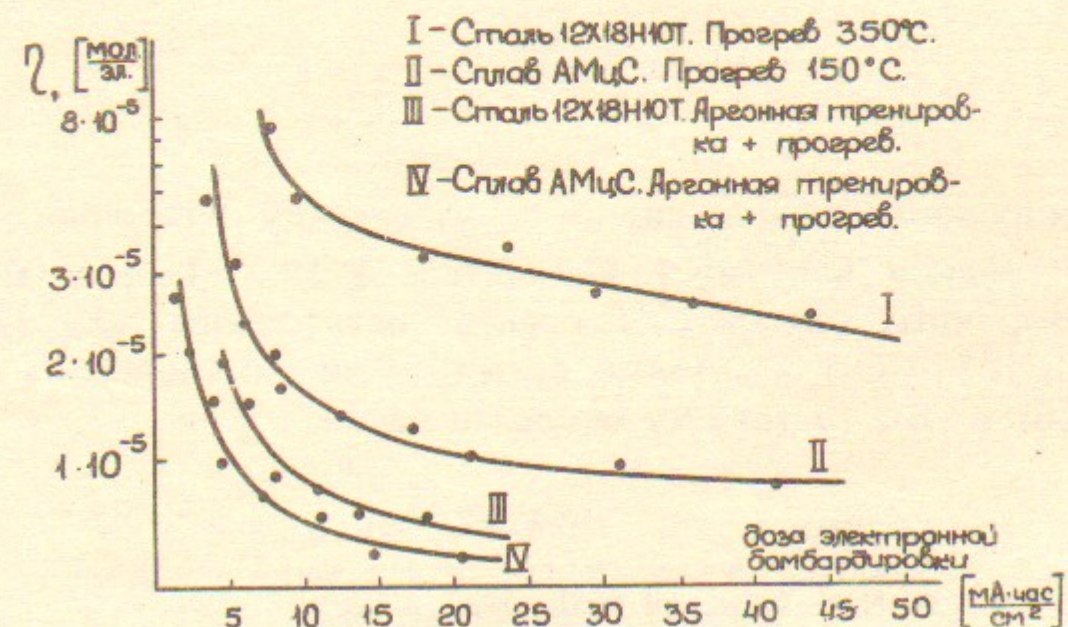


Рис. 11. Зависимость коэффициента электронно-стимулированной десорбции от дозы электронной бомбардировки.

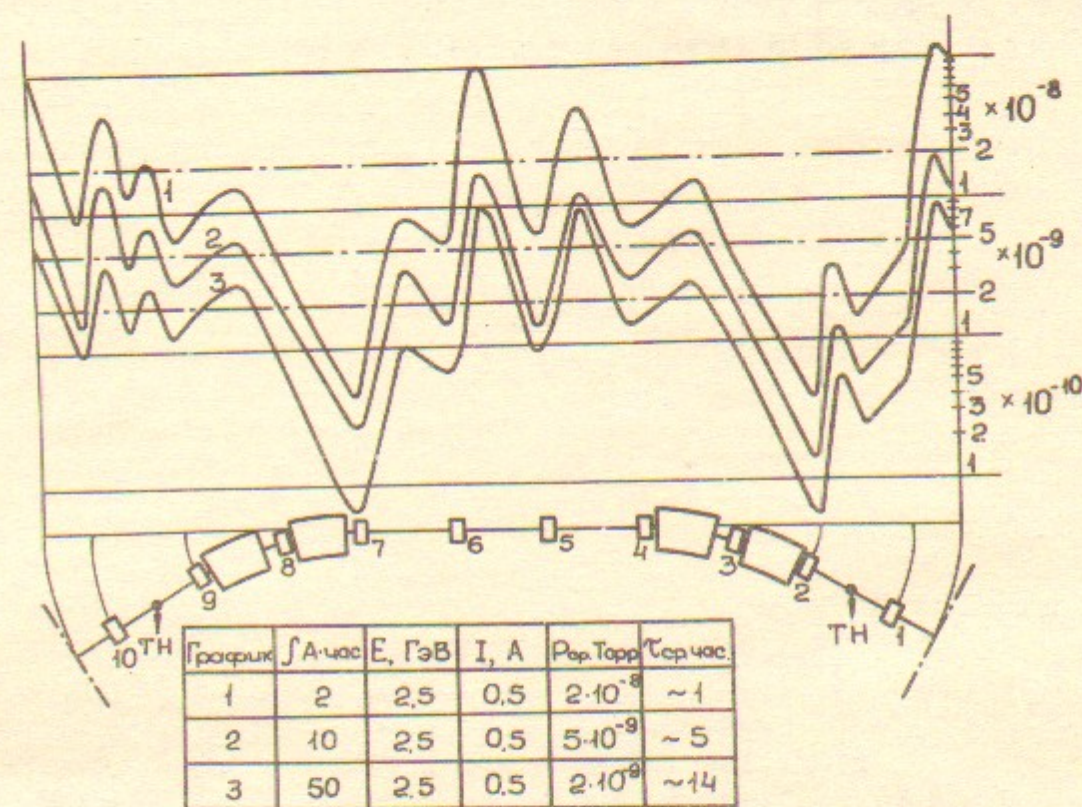


Рис. 12. Оценка среднего вакуума в накопителе «Сибирь-2» для разных интегральных доз СИ.

времени жизни записывается в виде

$$\frac{1}{\tau_{\text{эф}}} = \sum_i \frac{1}{\tau_i}, \quad (6)$$

где суммирование происходит по всему спектру остаточного газа.

При среднем вакууме в накопителе $2 \cdot 10^{-9}$ Торр и типичном для электронных накопителей спектре остаточного газа (70%- H_2 , 20%-CO, 10%-CO₂) вакуумное время жизни, вычисленное по формулам (5) и (6), составляет около 30 часов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kulipanov G.N. Nucl. Instr. and Meth., 1987, v.A261, p.1.
2. Анашин В.В., Зайцев В.И., Леонтьевская Л.Г., Мироненко Л.А. Быстродействующий прямопролетный клапан с дистанционным управлением. — Препринт ИЯФ СО АН СССР, 77-75, Новосибирск, 1977.
3. Анашин В.В., Вассерман И.Б., Вещеревич В.Г. и др. Электрон-позитронный накопитель-охладитель БЭП. — Труды девятого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна 1984. Дубна 1985, т. II.
4. Grobner O. Vacuum, 1983, v.3, N 7, p.397-406.
5. Grobner O. KEK 83-18, October, 1983, TRISTAN (A).

В.В. Анашин, Н.Г. Гаврилов, М.С. Гильденгорн,
Э.П. Коллеров, В.Н. Корчуганов, А.И. Никитин,
В.Н. Осипов, В.А. Роевко,
Э.М. Трахтенберг, Н.В. Фотин

**Вакуумная система специализированного источника
синхротронного излучения — накопителя «Сибирь-2»**

Ответственный за выпуск С.Г. Попов

Работа поступила 12 июля 1988 г.
Подписано в печать 26.08.88 г. МН 08444
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1,6 печ.л., 1,5 уч.-изд.л.
Тираж 250 экз. Бесплатно. Заказ № 109

Набрано в автоматизированной системе на базе фото-
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и
отпечатано на ротапинтере Института ядерной физики
СО АН СССР,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.