

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Ордена Ленина Сибирское отделение  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера СО РАН

К.В. Золотарёв, В.Е. Панченко, С.В. Хрущёв

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ПРОРАБОТКА ФРАНТЭНДОВ СИ  
ИЗ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ПОВОРОТНЫХ МАГНИТОВ 8.5 Тл  
НАКОПИТЕЛЯ 2.2 ГЭВ

ИЯФ 2008-31

НОВОСИБИРСК  
2008

**Предварительная проработка фронтэндов СИ  
из сверхпроводящих поворотных магнитов 8.5 Тл  
накопителя 2.2 ГэВ**

*К.В. Золотарёв, В.Е. Панченко<sup>\*)</sup>, С.В. Хрущёв*  
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера  
630090 Новосибирск

**Аннотация**

В связи с планом создания для Казахстана и в ИЯФ СО РАН специализированных источников жёсткого СИ – накопителей на энергии 2.2 ГэВ, имеющих в своей структуре сверхпроводящие поворотные магниты с полем 8.5 Тл, – актуальна предварительная проработка фронтэндов СИ из таких магнитов.

Рассмотрены траектория электронов в магните, схема фронтэндов, вакуум в них и в накопителе, а также система управления, блокировок и сигнализации (СУБС) фронтэндов и экспериментальных станций. Оценены расходы на все фронтэнды, вакуумное оборудование их и накопителя и на СУБС.

**Preliminary elaboration of front ends of SR  
from 8.5 T superconducting bending magnets  
of 2.2 GeV storage ring**

*S.V. Khrushcev, V.E. Panchenko<sup>\*)</sup>, K.V. Zolotarev*  
Budker Institute of Nuclear Physics, 630090 Novosibirsk, Russia

**Abstract**

For Kazakhstan and at INP SB RAS, there is a plan of creating the dedicated sources of hard SR. Such a source is the storage ring with the energy of 2.2 GeV and has superconducting bending magnets with the field of 8.5 T in its structure. In connection with this, preliminary elaboration of front ends of SR from such magnets is actual one.

Herein, the electron trajectory in the magnet, scheme of front ends, vacuum in them and in storage ring as well as the control, interlock and signaling system (CISS) of the front ends and experimental stations have been considered. Expenditure on all the front ends, vacuum equipment of them and storage ring as well as on CISS had been valued.

---

<sup>\*)</sup> email: [panchenko@inp.nsk.su](mailto:panchenko@inp.nsk.su)

---

## Введение

В ИЯФ СО РАН, в лаборатории Н.А. Мезенцева, разработан для накопителя BESSY-II, изготовлен и успешно испытан сверхпроводящий поворотный магнит (СМ) с полем до 9.6 Тл [1].

Несколько таких магнитов, включённых, наряду с обычными – тёплыми – поворотными магнитами, в накопитель с небольшой энергией электронов, от 1 до 2.5 ГэВ, позволили бы получать пучки весьма жёсткого СИ.

Был предложен проект компактного накопителя с энергией электронов 1.2 ГэВ, содержащего сверхпроводящие поворотные магниты, [2]. Однако потребность в накопителях с большей энергией – источниках более жёсткого СИ - и с оптимизированной магнитной структурой для Казахстана [3] и Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения вызвала необходимость разработки более крупной машины [4]. Это накопитель с энергией электронов 2.2 ГэВ, током 0.5 А, достижимым с алюминиевой вакуумной камерой кольца, и периметром около 210 м. В первом приближении предполагаются 36 магнитов с одинаковыми углами поворота траектории электронов в каждом. Четыре из них – сверхпроводящие с полем 8.5 Тл. При этом предусматривается конструктивная возможность замены любого из СМ в форс-мажорных обстоятельствах магнитом с полем около 1.6 Тл, как и во всех тёплых магнитах.

Из каждого поворотного магнита излучение выводится в основной, центральный, канал, а также в боковой, резервный, канал посредством франтэнда как части накопителя. Каналы, как обычно, размещены в экспериментальном зале. Разделяет франтэнды и каналы биозащита между ускорительным и экспериментальным залами.

Франтэнд содержит несколько элементов, и плотность их размещения диктуется расстоянием между магнитом и биозащитой.

Здесь рассматриваются траектория электронов в СМ, схема франтэндов, вакуум в них и в накопителе, а также система управления, блокировок и сигнализации (СУБС) франтэндов и экспериментальных станций. Оцениваются расходы на все франтэнды, вакуумное оборудование их и накопителя и на СУБС.

# 1. Франтэнд сверхпроводящего поворотного магнита

В системе координат СМ в пределах его вакуумной камеры значения  $z$ -составляющей поля  $B$  в зависимости от координаты  $y$  ( $|B_x|$  и  $|B_y| \ll |B_z|$ ) в медианной плоскости ( $z = 0$ ) приведены на рис. 1 и 2.

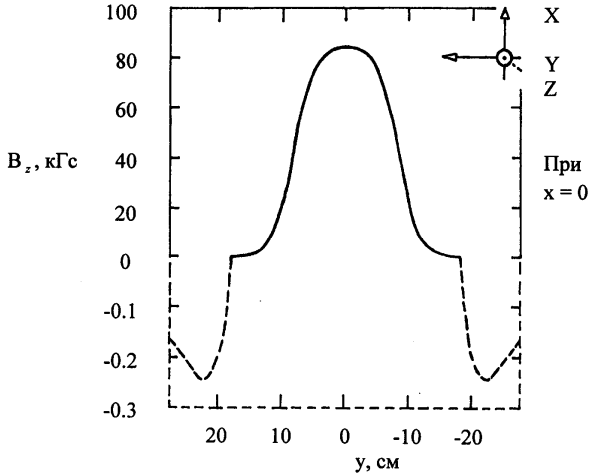


Рис. 1.

Проведённая с учётом функциональной зависимости  $B_z(y, x)$  (рис. 2) и в предположении постоянства энергии электронов  $\mathcal{E}_e = 2.2$  ГэВ в пределах вакуумной камеры СМ траектория электрона приведена на рис. 3.

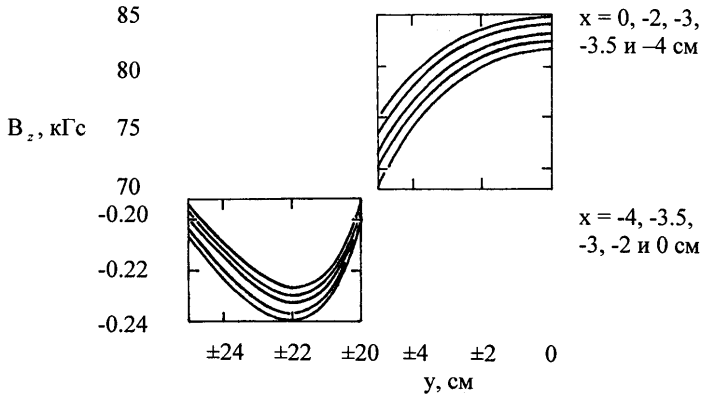


Рис. 2. Симметричные относительно оси X фрагменты профилей поля по оси Y при различных значениях  $x$ .

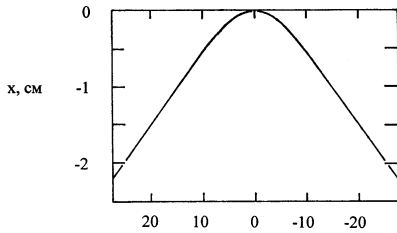


Рис. 3.

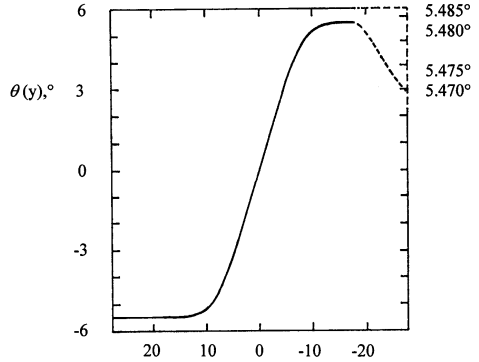


Рис. 4.

В таком предположении траектория, естественно, симметрична относительно оси X, а график зависимости угла  $\theta$  наклона траектории в пределах вакуумной камеры СМ в медианной плоскости по отношению к оси Y от y (рис. 4) симметричен относительно начала координат.

Угол поворота траектории электрона на её отрезке ( $L$ ) определяется интегралом z-составляющей поля по этому отрезку, то есть в радианах в системе единиц СГС величиной

$$[e/(\mathcal{E}_e^2 - m_e^2 c^4)^{1/2}] \int_{(L)} B_z(\ell) d\ell,$$

дающей поведение графиков на рисунках 4 и 3 на каждом отрезке их обоих. В пределах вакуумной камеры СМ (рис. 4) этот угол равен  $-10.939^\circ$ . В этих пределах длина траектории электрона составляет 55.2 см, а первый интеграл поля по всему соответствующему отрезку ( $L$ )

$$\int_{(L)} B_z(\ell) d\ell = 1401.049 \text{ кГс} \cdot \text{см}.$$

Обусловленная изменением импульса электрона на его траектории в магните потеря электроном энергии на СИ по всем направлениям определяется интегралом квадрата z-составляющей поля по траектории – вторым интегралом поля. На отрезке  $d\ell$  траектории в поле  $B_z(\ell)$  в плоскости XY потеря в СГС равна

$$(2/3)r_e^2 \gamma(\gamma^2 - 1)^{1/2} B_z^2(\ell) d\ell,$$

где релятивистский фактор  $\gamma = \mathcal{E}_e/m_e c^2$ . При приблизительном постоянстве его значения в пределах камеры СМ потеря на всей траектории электрона в этих пределах равна 59 кэВ, что составляет менее 0.003% от величины  $\mathcal{E}_e$ .

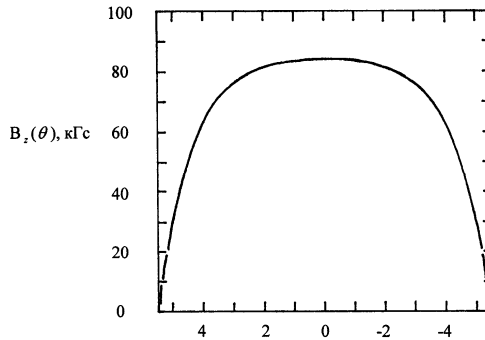


Рис. 5.

Наличие очень слабого поля  $B_z < 0$  за пределами вакуумной камеры СМ (см. рис. 1 и 2) обуславливает небольшие, пренебрежимо малые, поправки к указанным значениям угла поворота траектории (положительную) и первого интеграла поля (отрицательную), а также радиационных потерь (положительную) в пределах камеры.

Поле на траектории ( $z = 0$ ) показано на рис. 5.

Поворот траектории в СМ должен составлять ровно  $10^\circ$ , чему соответствует значение  $1280.794 \text{ кГс} \cdot \text{см}$  первого интеграла поля. Для достижения этого достаточно несколько модифицировать распределение поля в СМ, показанное на рисунках 1 и 2, ценой небольшой коррекции его конструкции для последующего производства.

Конструктивная схема содержащего поворотные СМ и тёплый магнит фрагмента накопителя приведена на рис. 6.

Выполняется общепринятое правило: подавляющая часть излучения – поворотных магнитов, а также вигглеров или ондуляторов в прямолинейных промежутках накопительного кольца [4] – попадает на охлаждаемые водой приёмники излучения (ПИ). Вакуумные камеры кольца и фронтэндгов облучаются лишь периферийными частями пучков СИ. Их мощность мала: охлаждение камер при погонной нагрузке порядка  $10 \text{ Вт/м}$  не нужно.

Все приёмники размещаются в вакуумных камерах фронтэндгов.

Вигглер – или ондулятор – вставляется в длинный [4] промежуток – между тёплыми магнитами (рис. 6): его излучение не проходит через вакуумную камеру СМ.

Боковые стенки этой камеры, на рис. 6 обозначенные штрихами, имеют горизонтальный угловой растрор  $10^\circ$ , в точности равный углу поворота траектории электронных сгустков в СМ: излучение из него на эти стенки не падает.

Приёмник излучения СМ охватывает угол  $10^\circ$  с некоторым запасом.

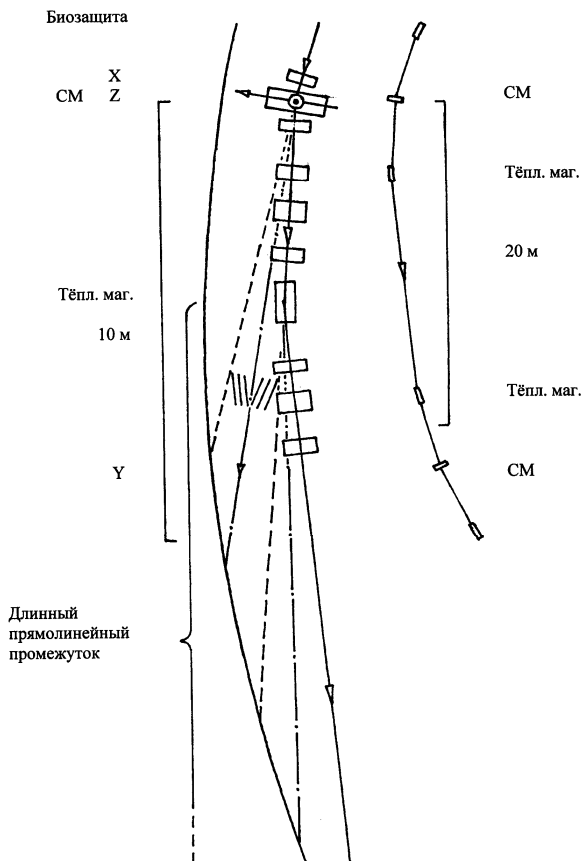


Рис. 6.

Количество электронов в сгустках (СГС)

$$(ce)^{-1} P I_e \gamma (\gamma^2 - 1)^{-1/2} = 2.2 \cdot 10^{12}$$

при токе  $I_e = 0.5$  А и периметре  $P = 210$  м.

Наиболее нагружена излучением центральная часть ПИ (рис. 5). Величина этой нагрузки

$$(2/3) \cdot 10^{-3} r_e \gamma (\gamma^2 - 1) V_z(0,0) I_e = 1.9 \cdot 10^9 \text{ (эрг/с)/мрад} = 190 \text{ Вт/мрад,}$$

где  $V_z(0,0) = 8.5$  Тл – поле в центре (рис. 1, 2 и 5). При сколько-нибудь приемлемом расстоянии между центром СМ и приёмником его излучения, с учётом необходимости размещения за ПИ ряда других элементов франтэнда, нагрузка на приёмник намного превышает допустимую, составляющую

100 Вт/см по горизонтали. Так, если указанное расстояние равно 5 м, она превышает 380 Вт/см. Уменьшение её до допустимого значения требует ориентирования поверхности ПИ под углом  $75^\circ$  к фронтальной плоскости.

Поэтому ясно, что приёмник должен быть секционированным, как это схематически изображено на рис. 6. Большое удаление ПИ от центра СМ неэффективно – и неприемлемо, помимо необходимости предусмотреть место для других элементов флантэнда, из-за неизбежности при этом дальнейшего наращивания поперечных, по горизонтали, размеров вакуумной камеры флантэнда, а также продольных размеров секций приёмника.

Недопустима деградация поверхности ПИ, даже когда она не оплаивается при эффективном охлаждении, в течение многих лет её экспонирования под пучком СИ. Нарастающий наклёп поверхности, приводящий к её осыпанию, не допускает использование в качестве материала приёмника меди. Её по устойчивости к наклёпу намного превосходит широко используемый в настоящее время сплав меди с алюминием GlidCop®.

Секционированным приёмником излучения завершается камера флантэнда.

Между двумя центральными секциями ПИ имеется окно для выпуска излучения в основной канал. За окном, на оси канала, обозначенной на рис. 6 штрих-пунктиром, друг за другом располагаются, уже вне камеры, перечисляемые ниже остальные элементы флантэнда.

Первым размещается охлаждаемый водой штыревой приёмник излучения с электроприводом.

Далее следует прогреваемый при тренировке вакуума шиббер вместе с защищающей от излучения края его окна при оперативной работе диафрагмой, охлаждаемой водой. В штатном режиме, когда шиббер закрыт, доступ к нему пучка СИ предотвращается введенным в пучок штыревым ПИ. При этом вакуум (вольность речи, строго – давление) в накопителе  $\sim 10^{-10}$  Тор простирается только до закрытого шиббера.

При открытом шиббере и, соответственно, выведенном из пучка СИ для оперативной работы штыревом ПИ этот вакуум достигает блоков бериллиевых фольг, каждая из которых диффузионной сваркой соединена с охлаждаемой водой медной обоймой с окном.

Последовательность входных фольг предназначена для погашения тепловой нагрузки на выходные фольги, разделяющие по вакууму накопительное кольцо и обращённую к каналу часть флантэнда.

Форс-мажорные ситуации с вакуумом в этой части флантэнда чреваты деградацией дорогостоящей, с обоймой, последней выходной фольги из-за фотохимических реакций. Поэтому вслед за нею помещается предохранительная, сменная, бериллиевая фольга. Объёмы между выходными фольгами откачиваются независимо друг от друга так же, как и объём между закрытым шиббером и блоками фольг.



Сразу за сменной фольгой следует первая диафрагма коллиматора тормозного излучения и ливней, состоящих из электронов, позитронов и фотонов.

Внутри коллиматора, завершающегося его второй диафрагмой, которая находится вблизи биозащиты, располагается тандем радиационных затворов. Они прогреваются при тренировке вакуума, их запорные элементы охлаждаются водой. Эти элементы универсальны по СИ, тормозному излучению и ливням. Затворы оперативно управляются пользователями СИ.

Наконец, непосредственно перед биозащитой размещается разделительная бериллиевая фольга фронтэнд/канал.

Места помещения боковых, резервных, каналов на кольце заранее предусмотреть невозможно. Поэтому нужно в каждом фронтэнде организовать цепочку, состоящую из окна между секциями ПИ в камере фронтэнда, штыревого ПИ за окном и шибера, для возможного резервного канала аналогично основному каналу. Выбор для него угла  $\theta$  по конструктивным соображениям и свойствам СИ предоставляет рисунок 5. Такая же цепочка нужна и по другую сторону от центрального канала для мониторингового детектора пучка СИ.

## 2. Фронтэнд тёплого поворотного магнита

Тёплый магнит полем 1.6 Тл поворачивает орбиту также на  $10^\circ$ . При таком слабом поле потеря энергии электроном в тёплом магните ничтожна в сравнении с величиной  $\mathcal{E}_e$ .

Через вакуумную камеру фронтэнда тёплого магнита, предшествующего сверхпроводящему (рис. 6), проходит излучение как тёплого магнита, так и вигглера или ондулятора, помещённого в длинном прямолинейном промежутке. Поэтому приёмники этой камеры принимают излучение в горизонтальном угле, превышающем  $10^\circ$ : она не симметрична относительно оси центрального канала тёплого магнита за счёт её развития наружу накопителя. Нагрузка приёмника излучения собственно тёплого магнита меньше, чем в случае СМ, просто в отношении 8.5 Тл / 1.6 Тл. Ясно, что, если отвлечься от излучения вигглера или ондулятора, о которых в настоящее время не имеется чётких представлений, приёмник излучения тёплого магнита примитивен. Он просто располагается поперёк пучка СИ, имея в своём сплошном теле три окна – для выпуска излучения в центральный и возможный резервный каналы, а также к мониторинговому детектору пучка СИ.

Нужно заранее предусмотреть размещение в периферийной области вакуумной камеры фронтэнда тёплого магнита, предшествующего сверхпроводящему, специального, локального, ПИ вигглера или ондулятора.

Для дополнительной безопасности конструкции ПИ тёплых магнитов и для единообразия с приёмниками излучения СМ в качестве материала для них предпочтительно использование сплава GlidCop®.

Цепочка остальных элементов этого франтэнда аналогична случаю СМ.

Важно заметить, что протяжённость тела запорного элемента радиационного затвора вдоль оси франтэнда, конечно же, определяется не СИ, а тормозным излучением и ливнями. Существенно то, что расположенному перед СМ тёплому магниту предшествует длинный прямолинейный промежуток – основной источник тормозного излучения и ливней при случайных, не контролируемых со стороны СУБС, сбросах электронных сгустков. Поэтому длину запорного элемента затвора, типового для всего комплекса СИ, диктует именно это обстоятельство.

### **3. Вакуум: радиационная десорбция; время жизни сгустков в накопителе; предварительный и стационарный вакуум накопителя**

Междуузлия решётки кристаллитов металла в его приповерхностном слое заполнены молекулами и атомами газа из окружающей среды. При этом заполнение находится в равновесии со средой: чем больше давление в ней, тем их больше в металле.

Металл отдаёт в окружающую среду ранее адсорбированные им молекулы и атомы газа – протекает десорбция, - когда он нагрет или когда среда – вакуумная. Это вялотекущий процесс. Наличие же свободных заряженных частиц радикально усугубляет десорбцию: газы интенсивно высвобождаются из металла вследствие бомбардировки ячеек решётки в его приповерхностном слое такими частицами.

Необезгаженный металл в начале бомбардировки на каждые 20 свободных электронов отдаёт в окружающую среду в среднем одну молекулу  $N_2$  или  $CO$  – эти молекулы, а также атомы гелия в основном адсорбируются металлами. По концентрации этих частиц принято судить о вакууме при использовании магнетронных манометров с холодным или накаливаемым катодом – теоретически до  $10^{-14}$  Тор, а практически вплоть до  $10^{-15}$  Тор. Адсорбируются также молекулы  $H_2$ ,  $CO_2$  и  $CH_4$ . Через несколько секунд после начала достаточно интенсивной бомбардировки указанная выше величина  $1/20 = 5 \cdot 10^{-2}$  молекул азота или окиси углерода на электрон падает до  $10^{-4}$ . При дальнейшем накоплении электронной дозы (рис. 7 для алюминия) заполнение приповерхностного слоя металла газами постепенно обедняется – при непрерывной работе насосов вакуум улучшается.

Таким образом, десорбция под воздействием потоков электронов представляет собой тренировку вакуумного объёма: обезгаживание металла

электронами позволяет в обозримые сроки, при накоплении достаточно большой электронной дозы, избежать вялотекущего выделения газа в объём.

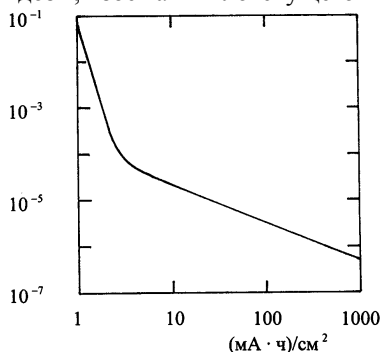


Рис. 7. Выход десорбированных молекул  $\text{N}_2$  или  $\text{CO}$  на один электрон в зависимости от накопленной электронной дозы для алюминия.

Конечно, эффективным и необходимым способом предварительного высвобождения газов из вакуумных камер является уже упоминавшийся выше их нагрев до допустимо высоких температур. Если габариты камер и их узлов позволяют поместить их в вакуумную печь, освобождение их от газов вначале делается их отжигом в печи. Затем они устанавливаются на объект. Достоинством алюминия является наличие на его поверхности естественной плёнки корунда  $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$ . Она несколько подавляет насыщение поверхности газами. Прогрев алюминия в вакуумных условиях непосредственно на объекте также необходим. Допустимы  $170^\circ\text{C}$ .

Выбывание электронов из стационарно циркулирующих в накопителе сгустков обусловлено их параметрами, в том числе значением  $I_e$ , определяемых его магнитной структурой и свойствами вакуумной камеры кольца. Вообще время жизни сгустков тем больше, чем меньше величина  $I_e$ . Оно уменьшается из-за индивидуальных взаимодействий электронов с атомами остаточного газа в камере: на рис. 8 представлена приблизительная зависимость времени жизни по вакууму от давления в камере.

Тормозное излучение электронов сгустков на ядрах и частично на связанных электронах атомов остаточного газа является одним из стационарных факторов радиационной опасности. Но главный фактор – это тормозное излучение на стенке камеры, куда они попадают в результате их рассеяния на большие углы на атомах остаточного газа. Именно для уменьшения мощности дозы по этому фактору предназначен формируемый двумя диафрагмами коллиматор во франтэнде.

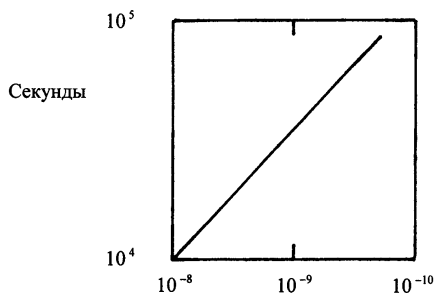


Рис. 8. Время жизни электронных сгустков в зависимости от давления по молекулам  $N_2$  и  $CO$ .

Потоки свободных электронов в накопителе генерируются пучками СИ, падающими на приёмники излучения. Свободные электроны – это фотоэлектроны, электроны внутренней конверсии и комптоновские электроны отдачи. Один фотон с энергией более 10 эВ порождает в приповерхностном слое металла  $0.1 \div 0.2$  свободных электронов: квантовый выход равен  $0.1 \div 0.2$  свободный электрон/фотон. При этом фотоэлектрон может покинуть этот слой, пролететь в вакууме большое расстояние и, попав на любую стенку, вызвать десорбцию. Он также может вызвать десорбцию на поверхности своего рождения, если присутствует достаточно сильное возвращающее магнитное поле. В основном электроны внутренней конверсии и комптоновские электроны отдачи – а также некоторые фотоэлектроны – не вылетают из металла, успев иногда, однако, вызвать десорбцию здесь же: её эффективность приблизительно на порядок меньше, чем в представленном на рисунке 7 случае высвобожденного из металла фотоэлектрона. Высвобождающиеся из металла фотоэлектроны таким же образом дают некоторый вклад в десорбцию здесь же.

Итак, СИ в накопителе играет очень существенную роль в улучшении вакуума.

Падающий на приёмник излучения пучок СИ рассеивается, а также возбуждает рентгеновские серии элементов, составляющих материал ПИ, в первую очередь меди.

На практике обычно используется выход десорбированных молекул газа не на свободный электрон, а на один фотон (molecular desorption yield)  $\eta$ , причём оправдывается имеющая место также при бомбардировке поверхности электронами пропорциональность

$$\eta \approx \text{const}(1/\sin\varphi),$$

где  $\varphi$  – угол скольжения падающего на поверхность пучка. Эта пропорциональность выполняется только при больших значениях  $\varphi$ , то есть при падении, близком к нормальному (рис. 9). При малых же значениях  $\varphi$

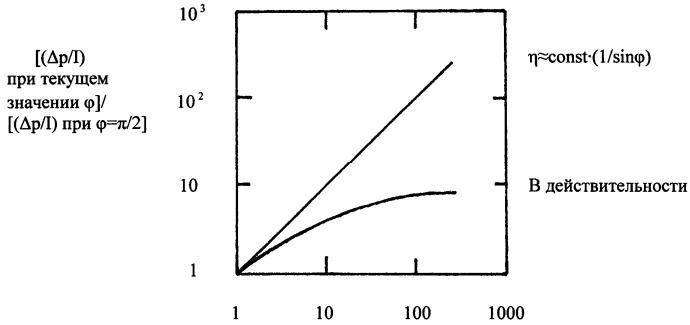


Рис. 9. Алюминиевая камера ускорителя European LEP.

из-за рассеяния фотонов в приповерхностном слое металла она нарушается. На рисунке 9  $\Delta p/l$  – удельный рост давления из-за десорбции, а  $I$  – интенсивность СИ. Выход десорбированных молекул газа на фотон падает (рис. 10) с накоплением фотонной дозы. В этом и заключается тренировка вакуума синхротронным излучением.

Радиационная десорбция в рассматриваемом накопителе обеспечивается излучением циркулирующих в нём  $2.2 \cdot 10^{12}$  электронов. Среднее количество фотонов, испускаемых сгустками на замкнутой траектории в единицу времени, не зависит ни от значений поворачивающих её магнитных полей, ни от величины периметра. Оно равно

$$(5\pi / \sqrt{3})(\alpha/e)\gamma I_e$$

– определяется лишь энергией частиц и током. Здесь это около  $9 \cdot 10^{20}$  фотон/с. При такой значительной мощности фотонной дозы (ср. рис. 10) достижимо доведение вакуума до  $10^{-10}$  Тор, если выполняются следующие условия.

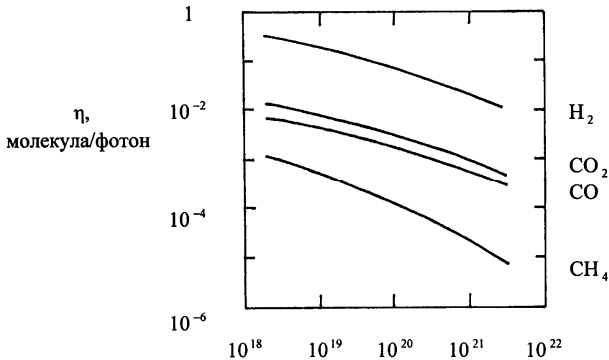


Рис. 10. Необезгаженные алюминиевые камеры Orsay и DESY с различными предварительными обработками.

Во-первых, осуществляется предварительный отжиг узлов камер кольца и фланцев в вакуумной печи. Из-за дороговизны технологии с алюминием нет необходимости делать из него все узлы камер фланцев: удалённые от электронной орбиты части камеры фланца (рис. 6) проще изготовить из нержавеющей стали, отжигаемой при 300°C. После такого отжига требуется месячная откачка в собранном виде.

Поэтому, во-вторых, для сокращения срока непременно нужен их прогрев в сборе с непрерывной откачкой. Это общепринято. При этом нужно учитывать наличие в камере фланца деталей из сплава GlidCop® и меди, а также припоя.

В-третьих, для поддержания сверхвысокого вакуума в течение многих лет периодически должны включаться титановые испарители, встроенные в непрерывно работающие насосы. Эти включения делаются в отсутствие сгустков в накопителе: от одного раза в месяц при  $10^{-9}$  Тор до раза в год при  $10^{-10}$  Тор. 1 см<sup>2</sup> свежего, ещё не насыщенного газами, титанового геттера имеет быстроту действия 10 л/с при  $10^{-7}$  Тор. Предварительный вакуум кольца в совокупности, естественно, с камерами фланцев создаётся следующим образом.

Каждый участок кольца, отделённый от соседних участков прогретыми RF-шиберами, имеет снизу патрубков с прогретым шиберами и CF-фланцем. Для обслуживания всего кольца создаётся передвижная установка, состоящая из турбомолекулярного вакуумного поста Pfeiffer, присоединяемого через CF к участку кольца, и течеискателя. Пост содержит турбомолекулярный насос (ТМН) с быстротой действия 200 ÷ 300 л/с при  $10^{-7}$  Тор и мембранный насос, обеспечивающий разрежение 3 ÷ 4 Тор. Течеискатель имеет собственный ТМН. Его следует снабдить безмасляным (спиральным) форвакуумным бустером.

Обеспечиваемый этой установкой вакуум в участке кольца измеряется присоединённым к её входу датчиком Pfeiffer. До  $10^{-3}$  Тор в датчике работает манометр Пирани, а до  $10^{-8}$  Тор – манометр Пеннинга. Выносной пульт датчика встроен в панель поста. Кроме того, датчик выдаёт показания о состоянии вакуума в миллибарах в реальном времени на какое-либо внешнее устройство. На входе установки имеется жиклёрный напускатель атмосферы.

Ни одно из устройств для обеспечения предварительного вакуума не нуждается в каком-либо охлаждении, в том числе и жидким азотом. Все они безмасляные.

Стационарный вакуум кольца в совокупности с камерами фланцев создаётся так. Камера кольца имеет на каждых 4 ÷ 5 метрах длины снизу ионно-геттерный пост ПВИГ с быстротой действия 1000 л/с при  $10^{-7}$  Тор. Разработанный в ИЯФ СО РАН пост ПВИГ внедрён в производство в

г. Искитиме Новосибирской области. Имеет 6 титановых испарительных секций, используемых последовательно во времени по мере истощения предыдущей. Одна секция обеспечивает 100 операций испарения. Одна операция длится 7 мин. При поддержании в объекте стационарного вакуума  $\sim 10^{-10}$  Тор использование испарителей поста является практически бессрочным. Естественное показание состояния вакуума – ток разряда в ПВИГ. Не нужны ни дистиллят, ни жидкий азот.

В комплекте с постом ПВИГ поставляются разгонный блок питания для черновой откачки и блок питания для испарителей.

Блоки питания для стационарной работы – чистовой откачки – производства г. Выборг.

Таким образом, нет нужды в импортных насосах NEG (non-evaporated getter).

Камера каждого франтэнда имеет два поста ПВИГ, снизу и сверху, вблизи приёмников излучения (рис. 6).

Блоки бериллиевых фольг – производства ИЯФ СО РАН. Прогрев блоков ограничен  $200^{\circ}\text{C}$ .

Независимо от состояния шибера, следующего за штыревым ПИ, объём перед блоками фольг постоянно откачивается магниторазрядным диодным насосом НМД с быстротой действия 25 л/с при  $10^{-7}$  Тор. Этот объём отделяется клапаном с металлическим уплотнением от переносного турбомолекулярного поста, создающего предварительный вакуум в объёме.

Аналогично обеспечивается вакуум в объёмах между выходными фольгами.

Неохлаждаемая предохранительная сменная фольга, следующая за последней выходной фольгой на медной обойме, уплотняется на индии. Её прогрев – при  $100^{\circ}\text{C}$ . Объём между этими фольгами откачивается так же, как в предыдущих случаях.

Содержащий тандем радиационных затворов объём между предохранительной фольгой и уплотнённой также на индии фольгой, отделяющей франтэнд от канала, откачивается таким же образом, только насос НМД нужен с быстротой действия 63 л/с. Токи разряда в постах ПВИГ и насосах НМД непрерывно контролируются из вакуумной комнаты ускорительного комплекса. Показания выводятся на табло в пультовой комплекса.

Не требующие охлаждения насосы НМД поставляются изготовителем из г. Искитим вместе с разгонными блоками питания. Для указанных здесь целей достаточны турбомолекулярные посты Pfeiffer эконом-класса.

Надёжность такого отделения накопителя от выходной части франтэнда по вакууму подтверждена в течение тридцати лет в ИЯФ СО РАН на накопителях ВЭПП-3 и ВЭПП-4М.

#### 4. СУБС фронтэнд и экспериментальных станций

Элементами фронтэнда, управляемыми или контролируемые системой УБС, а также системой сигнализации комплекса (две последние позиции), являются

- радиационные затворы;
- штыревые приёмники излучения;
- электроприводные люминофорные датчики положения пучка СИ с видеокамерами, выводящими изображения на монитор в типовой стойке электроники (СЭ) СУБС;
- термодатчики на выделенных поверхностях камеры фронтэнда. Показания выводятся на табло в пультовой комплекса;
- датчики расходомеров дистиллята во всех охлаждаемых им элементах фронтэнда. Показания также выводятся на табло.

Система УБС функционально связана с

- пультом управления накопителем посредством блоков в стойках пультовой электронных стоек комплекса,
- автоматизированной системой радиационного мониторинга (АСРМ) полей рентгеновского излучения в экспериментальном зале,
- радиационно-опасным отсеком станции – хатчем.

Эти связи осуществляются приблизительно десятью стойками электроники СУБС, размещаемыми в экспериментальном зале вокруг биозащиты.

Стойка содержит большинство электронных блоков СУБС, монитор видеокамер люминофорных датчиков положения пучка СИ, блок сигнализации АСРМ, блок питания для него и вакуумметр трассы пользователей СИ. Она обслуживается персоналом фронтэнд и оперативно доступна для пользователей. Одна стойка рассчитана на группу нескольких станций.

К каждой станции от стойки вынесена индивидуальная часть блоков СУБС, предназначенная для пользователей этой станции. Пользователь станции управляет своими затворами, находясь или в экспериментальном зале вблизи неё, или в другом помещении. Кроме того, он может делать это от ЭВМ.

Посредством блоков управляющего реле в пультовой электронных стоек комплекса пульт управления накопителем разрешает – или отменяет – режим «Эксперимент» для всех станций.

Без ведома пользователей или с предварительным уведомлением их после согласования с ними пульт даёт электронную команду стойкам электроники СУБС закрыть все затворы перед отменой режима «Эксперимент». Стойки автоматически исполняют эту команду.



Пульт управления накопителем также опрашивает состояния всех затворов – каждого в отдельности – посредством сборщиков двоичных состояний (СДС) в пультовой электронных стоек. С помощью СДС на пульте копится информация об эффективности использования пучкового времени пользователями на каждой станции.

Электромеханическая блокировка двери хатча станции исключает её открытие, если открыт хотя бы один затвор этой станции.

На случай, когда после отмены режима «Эксперимент» хотя бы один затвор остался открытым, в СЭ СУБС предусмотрен блок сигнализации, который звуком и световым табло извещает об этом конкретных пользователей. При этом включается электромеханическая блокировка двери хатча данной станции, исключающая открытие двери. На работе накопителя и всех других станций это никак не сказывается.

АСРМ имеет детекторы рентгеновского излучения по крайней мере по количеству станций. Детекторы распределены вокруг биозащиты в экспериментальном зале так, что окрестность каждой станции охвачена одним детектором. Блок сигнализации АСРМ в СЭ СУБС получает в форме последовательных кодовых посылок обработанные в компьютере данные со всех детекторов, обслуживающих данную группу станций, по одному кабелю и разветвляет их в стойке поимённо для каждого из них – для каждой станции. Регистрация детектором превышения сигнального уровня мощности дозы свидетельствует о выпуске излучения из хатча. При этом блок сигнализации АСРМ даёт команду системе УБС закрыть затворы данной станции. В исключительном случае чрезмерного превышения по логическому сигналу «или» закрываются затворы группы станций или всех станций.

СЭ СУБС – продукт тридцатилетнего развития в процессе непрерывного практического использования на комплексах СИ накопителей ВЭПП-3 и ВЭПП-4М ИЯФ СО РАН и ныне представляет собой универсальный стандарт. Логическая организация стойки исключает возможность её повреждения даже при неправильных действиях недостаточно квалифицированных пользователей. С другой стороны, она готова принять в себя новые устройства, то есть рассчитана на дальнейшее развитие.

Однако назрела необходимость перевода сложившейся СЭ СУБС в евромеханику. Две отличительные особенности этого стандарта, к которому в настоящее время персонал франтэндов начинает переход, - это возможность замещения привычного кросса стойки электронными кросс-платами и использование широкого ассортимента блоков питания вместо, например, того, который обеспечивается системой КАМАК. Этот переход, естественно, совмещается с некоторым, назревшим, обновлением элементной базы электронных блоков.

Евромеханика обеспечивается компанией Schroff, имеющей своё представительство в новосибирском Академгородке. Её продукты – это

поставляемые вроссыпь и рассчитанные на отвёрточную сборку все необходимые элементы корзин различных размеров, в том числе неполноразмерные передние панели блоков, а также шкафы в широком ассортименте.

С изделиями компании Schroff совместимы разнообразные блоки питания, производимые компаниями Power-One, Meanwell и Traco. Последние – дорогостоящие – для зон повышенной радиации.

В кросс-платах помещаются разъёмы производства компаний Harting и AVX (в широком ассортименте, силовые помечаются как тип H), а также любые отечественные разъёмы.

Устарела гравировка: заменена шелкографией, освоенной в экспериментальном производстве ИЯФ СО РАН и развиваемой на участке гибридных микросхем электронной лаборатории.

## **5. Оценки для технико-экономического обоснования**

Входная часть канала, начинающаяся за фольгой, отделяющей его от выходной части франтэнда, размещена в окне в биозащите. В окне канал должен иметь некоторую свободу по вертикали и горизонтали для осуществления окончательной, геодезической, юстировки его положения перед запуском накопителя в эксплуатацию. Биозащита в плане имеет форму окружности (рис. 6), но целесообразно и общепринято обрамления окон делать перпендикулярными к осям каналов. В находящейся перед окном входной части канала делается сужение по вертикали до 20 мм в просвете для минимизации потоков тормозного излучения и ливней. Оно плотно охватывается свинцовым воротником по этому радиационному фактору. Изготовление биозащиты с зигзагами в некоторой вертикальной окрестности медианной плоскости в рамках капитального строительства и обустройство всех окон защитой от тормозного излучения и ливней, а также приспособлениями для юстировки с необходимым учётом мониторных и возможных резервных каналов оценивается в 1 млн. €.

Плоские сверхвысоковакуумные камеры всех франтэндов, имеющие  $\Delta$ -видную форму (рис. 6) и оснащённые термодатчиками: 3 млн. €.

Обращённые к каналам выходные части франтэндов, оснащённые элементами для резервных и мониторных каналов по минимуму и вместе с бериллиевыми фольгами и люминофорными датчиками положения пучка СИ с телевизионной оснасткой содержащие диафрагмы коллиматоров для основных каналов: 2.5 млн. €.

Все приёмники излучения: 3.5 млн. €.

Прогреваемые сверхвысоковакуумные шиберы, следующие во франтэндах за штыревыми ПИ, с учётом возможных резервных и мониторных каналов и охлаждаемых водой защитных диафрагм перед шиберами: 2.5 млн. €.

Приобретение за рубежом отработанных и сертифицированных затворов представляется более предпочтительным, чем разработка, изготовление и доводка их на основе роторных затворов ИЯФ СО РАН – теперь уже с охлаждаемыми запорными элементами. Кроме того, пришлось бы ещё для изготовления запорных элементов приобретать дорогостоящий «сплав» ВМ-20 (эльконайт) у ООО «Победит» в Петербурге, которое само закупает вольфрамовый порошок во Владикавказе. Возможные поставщики затворов: 1) Oxford Instruments ([oxford@oxinst.ru](mailto:oxford@oxinst.ru) – московское представительство Oxford Instruments NanoAnalysis; [Sales@oxford-diffraction.com](mailto:Sales@oxford-diffraction.com) – в Англии); 2) Advanced Design Consulting USA, Inc. (ADC) ([adc@adc9001.com](mailto:adc@adc9001.com); Phone: 607.533.3531 · Fax: 607.533.3618 · Web: [www.adc9001.com](http://www.adc9001.com)). Оценка для всех центральных каналов: 1.5 млн. €.

Здесь не учитываются расходы на оборудование электротехническими устройствами единой для всего ускорительного комплекса вакуумной комнаты, а также на обеспечение её связей со всей вакуумной техникой комплекса кабельными трассами, большей частью высоковольтными. Вакуумное оборудование флантэндов, преимущественно принимающих на себя радиационную десорбцию, оценивается в 2.7 млн. €, а накопительного кольца – в 1.8 млн. €.

Создание обеспеченного системой фильтров общего хозяйства дистиллята ускорительного комплекса относится к капитальному строительству и здесь по полному объёму расходов не может быть оценено даже приблизительно. Распределительные же трассы дистиллята для всех флантэндов, оснащение их элементов расходомерами с датчиками и системой регистрации показаний датчиков, а также сигнализации потребуют около 1 млн. €.

На оснащение дверей хатчей всех станций на основных каналах электромеханическими блокировками – 0.3 млн. €.

СЭ СУБС в стандарте евромеханики с полной «набивкой» блоками вместе с вынесенными от них к станциям фонарями сигнализации и блоками индикации блокировок на станции, а также с пультами дистанционного управления и всеми кабельными трассами потребуют около 2.2 млн. €.

Вакуумная трасса пользователей СИ – 0.2 млн. €.

Подставки под флантэндами с регулировками – 0.7 млн. €.

Полные расходы в приведенных оптимистических оценках достигают почти 23 млн. €.

## **Заключение**

Всё изложенное здесь рассматривается в качестве первичного технического задания для конструкторского и проектировочных бюро.

Дальнейшие действия, в первую очередь, планируется выполнить по двум следующим вопросам.

Во-первых, это полная физико-техническая проработка нетривиальной системы блоков бериллиевых фольг.

И, во-вторых, это анализ всех факторов радиационной опасности, обуславливаемых работой накопителя, а также рассмотрение роли возможных пробников в этом вопросе и необходимости оснащения кольца скреперами.

## Литература

- [1] *S.V. Khruschev, et al.* 9 Tesla superbend for BESSY-2, Proceedings of APAC 04, S. Korea, 2004; A.M. Batrakov, S.V. Khruschev, D. Kraemer, G.N. Kulipanov, V.H. Lev, N.A. Mezentsev, E.G. Miginsky, V.A. Shkaruba, V.M. Syrovatin, V.M. Tsukanov, V.K. Zjurba, K.V. Zolotarev, Nine tesla superconducting bending magnet for BESSY-II, Nucl. Instr. and Meth. A 543 (2005) 35-41.
- [2] *E.I. Antokhin, A.A. Gvozdev, G.N. Kulipanov, P.V. Logachev, N.A. Mezentsev, V.E. Panchenko, A.V. Philipchenko, Y.V. Rakshun, A.V. Utkin, N.A. Vinokurov, K.V. Zolotarev.* Compact hard X-ray synchrotron radiation source based on superconducting bending magnets, Nucl. Instr. and Meth. A 575 (2007) 1-6.
- [3] *K. Kadyrzhanov, S. Lysukhin, E. Antokhin, K. Zolotarev, N. Mezentsev, G. Kulipanov, A. Philipchenko, V. Panchenko, A. Utkin.* Project of 2 GeV synchrotron light source for the Republic of Kazakhstan, APAC 2007, Raja Ramanna Centre for Advanced Technology (RRCAT), Indore, India (<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/a07/PAPERS/TUPMA023.PDF>), 4 pages.
- [4] *ZOLOTAREV, Konstantin.* Project Of A New Hard X-Ray Source For Siberian Synchrotron Radiation Center, and MEZENTSEV, Nikolai, Survey of Superconducting Insertion Devices in Budker INP, both at Nanobeam 2008 Workshop Sunday 25 May 2008 – Friday 30 May 2008, Budker Institute of Nuclear Physics, Thursday 29 May 2008 / Accelerator technology (00h45'); E.I. Antokhin, G.N. Kulipanov, N.A. Mezentsev, V.E. Panchenko, A.V. Philipchenko, Y.V. Rakshun, N.A. Vinokurov, K.V. Zolotarev, Project of a new hard X-ray source for Siberian Synchrotron Radiation Center, Digest reports of the XVII International Synchrotron Radiation Conference **SR – 2008**, June 15-20, 2008, Novosibirsk, Russia, page (4-11).