

ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЦКП «СКИФ»

В.В. Анашин, Г.А. Гусев, А.А. Жуков, А.А. Краснов, В.С. Кузьминых, П.А. Пиминов,
А.М. Семенов

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены ключевые решения, принятые за основу в проектировании вакуумной системы будущего источника синхротронного излучения ЦКП СКИФ (Кольцово, Новосибирская область, Россия). Основное внимание уделяется компромиссному использованию комбинированных сосредоточенных насосов вместе с распределенной откачкой на основе нераспыляемых геттеров (NEG). Дана оценка времени, необходимого для тренировки вакуумной камеры релятивистского пучка накопителя ЦКП СКИФ. Рассмотрены конструкции основных элементов вакуумной системы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

СВЕРХВЫСОКИЙ ВАКУУМ, НЕРАСПЫЛЯЕМЫЙ ГЕТТЕР, НАКОПИТЕЛЬ, ИСТОЧНИК СИ

VACUUM SYSTEM OF SYNCHROTRON RADIATION LIGHT SOURCE SRF “SKIF”

V.V. Anashin, G.A. Gusev, A.A. Zhukov, A.A. Krasnov, V.S.Kuzminykh, P.A.Piminov, A.M. Semenov

ABSTRACT

The manuscript considers the key decisions taken as a basis in the the vacuum system design of the future synchrotron radiation source SRF “SKIF” (Koltsovo, Novosibirsk region, Russia). The focus is on the trade-off of using combined lumped pumps along with distributed pumping based on non-evaporable getters (NEG). An estimate of the time required for training the vacuum beam pipe of the SKIF storage ring is given. Designs of the main elements for the vacuum system are considered.

KEYWORDS

ULTRA-HIGH VACUUM, NON-EVAPORABLE GETTER, STORAGE RING, SYNCHROTRON RADIATION SOURCE

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время создается источник синхротронного излучения (СИ) поколения 4+ ЦКП «СКИФ» [1]. В основе лежит циклический накопитель электронов с энергией 3 ГэВ периметром 476 м и ультрамалым эмиттансом пучка 75 пм·рад. Накопитель состоит из 16 суперпериодов с длинными бездисперсионными промежутками (~ 6 м). Три промежутка предполагается использовать для инжекции и ВЧ-систем, а оставшиеся для постановки специализированных генераторов синхротронного излучения (вигглеров или ондуляторов). Кроме того, в каждом суперпериоде организуется 2 канала вывода СИ из поворотных магнитов: один с поворотного магнита с малым полем (0.5 Тл) для генерации ультрафиолета и мягкого рентгена, один из с поворотного магнита с большим полем (2 Тл) для жесткого рентгена. В накопителе будут работать 2 ВЧ системы: основная (357 МГц) для компенсации потерь энергий и гармоническая (1071 МГц) для удлинения сгустка. Полный ток 400 мА в

510 ступка (при полном заполнение сепаратрис с 10% разрывом). Предполагается инжекция на энергии эксперимента, благодаря чему будет поддерживаться постоянный циркулирующий ток пучка. В качестве инжектора будет использоваться 200 МэВ линейный ускоритель и бустерный синхротрон с периметром 150 м, который будет осуществлять ускорение пучка с 200 МэВ до 3 ГэВ. Частота инъекций – 1 Гц. Инжектор вынесен в отдельное здание и связан с накопителем длинным транспортным каналом. Накопитель и большой экспериментальный зал размещаются в одном здании на едином фундаменте. Несколько специализированных станций СИ выносятся в отдельностоящие здания.

Конструкции магнитооптической системы современных источников синхротронного излучения (СИ) с малым эмиттансом [2] существенно ограничивают доступную апертуру для вакуумных камер пучка. Поэтому распределенные вакуумные насосы на основе нераспыляемых геттеров (NEG), впервые примененные в вставных устройствах источника СИ ESRF [3], приобретают все большую популярность. Например, практически все вакуумные камеры пучка источников СИ MAX-IV [4] и SIRIUS [5] имеют тонкопленочное NEG покрытие. На практике такая система не нуждается в какой-либо тренировке под излучением. Это означает, что требуемый динамический (в присутствии пучка) сверхвысокий вакуум может быть достигнут сразу после активации NEG [3,6]. Но сама активация представляет собой процедуру прогрева при $180\div 200^\circ\text{C}$, для которой требуется демонтаж прецизионных магнитов (решение MAX IV) или пространство для установки нагревателей и теплоизоляции (решение SIRIUS) и большого количества механических компенсаторов с RF контактами. С другой стороны, разработанные в последние годы компактные комбинированные вакуумные насосы на основе картриджей NEG и магниторазрядных ионно-геттерных насосов [7], дают возможность вернуться к классической системе с сосредоточенными насосами, но размещенными на небольшом расстоянии; около одного метра или даже меньше.

Вакуумная система накопительного кольца СКИФ будет содержать как распределенные насосы, на основе покрытий NEG, так и сосредоточенные комбинированные насосы. Покрытие NEG будет использоваться в прямолинейных промежутках и в вставных устройствах с мало-апертурными камерами, работающих при комнатной температуре. Сосредоточенные насосы будут применяться в арках, составляющих 80% периметра накопителя и содержащих множество прецизионных магнитных элементов. Такое решение позволяет исключить процедуру прогрева в арках, и, следовательно, минимизировать количество механических компенсаторов – источников высокочастотных геометрических импедансов. Кроме того, применение большого количества ионно-геттерных насосов значительно снижают зависимость предельного вакуума (по сравнению с NEG) от суммарного уровня микро-течей, что существенно повышает надежность вакуумной системы в целом.

Предельные параметры накопителя СКИФ во многом будут зависеть от исполнения вакуумных камер пучка. Поэтому особое внимание уделяется подбору материалов для изготовления вакуумных элементов, конструкциям откачных портов и соединительных элементов для минимизации резистивных и геометрических импедансов. Система откачки должна обеспечивать разрежение на уровне $P_n = 3.3\text{E-}7$ Па (в азотном эквиваленте) для достижения «вакуумного» времени жизни пучка не менее 10 часов при номинальном токе $I_n = 0.4$ А.

ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ТРЕНИРОВКИ ПОД ИЗЛУЧЕНИЕМ

Геттерная пленка трансформирует поверхность вакуумных камер из источника десорбирующихся молекулярных потоков в поглотитель (сорбционный насос) молекул. Поэтому, как уже было отмечено, динамический сверхвысокий вакуум достигается сразу после прогрева (активации NEG) на всех участках с геттерным покрытием (примерно 20% периметра в случае накопителя СКИФ). Таким образом вопрос оценки времени тренировки внутренней поверхности под действием СИ, необходимого для достижения требуемого динамического уровня разрежения, актуален только для арочных участков СКИФ, где будут применены сосредоточенные комбинированные насосы.

На начальной стадии проектирования невозможно предугадать координаты доступных участков для подключения сосредоточенных насосов. Тем не менее, именно на начальной стадии проекта, необходимо с достаточной точностью определить количество и параметры насосов для формулирования задания на проектирование. Очевидно, что эквидистантное расположение одинаковых сосредоточенных насосов является наилучшим первым приближением. Кроме того, применяя диффузионную модель Кнудсена и допуская усреднение распределенного потока молекул со стенок вакуумной камеры, легко получить выражение для среднего квазиравновесного давления:

$$\hat{P} = \frac{qL^2}{12} + P_s = \frac{qL^2}{12} + \frac{qL}{s} = \frac{qL^2}{12(1-k)},$$

где q [Па·л/м·с] – равномерно распределенная газовая нагрузка (десорбция молекул со стенок камеры), L [м] – расстояние между насосами, S [м³/с] – эффективная быстрота откачки порта с насосом, u [м⁴/с] – молекулярная проводимость камеры единичной длины, $k = P_s/\hat{P}$ коэффициент использования насосов (обычно 0.2...0.5), P_s – давление на входе насоса.

Интересно отметить, что варьирование расстоянием между насосами от 0.5L до 1.5L, при сохранении общего количества насосов, приводит к увеличению среднего давления в 1 ÷ 1.6 раза по сравнению со случаем эквидистантного расположения. Эффективность расположения насосов можно учесть, введя соответствующий коэффициент g :

$$\hat{P} = g \frac{qL^2}{12(1-k)}. \quad (1)$$

В источниках СИ практически вся поверхность вакуумной камеры пучка подвержена воздействию интенсивного потока фотонов с энергиями, значительно превышающими энергию химических связей. Поэтому десорбция под действием СИ значительно превышает термодесорбцию. Сечение взаимодействия фотонов СИ с молекулами на 2÷3 порядка меньше, чем сечение неупругих электрон-молекулярных взаимодействий при энергиях электронов 20÷1000 эВ. Поэтому десорбция газа под действием синхротронного излучения происходит в два этапа: фотоны выбивают с облучаемой поверхности фотоэлектроны (на некоторой глубине от поверхности), которые, в свою очередь, могут привести к десорбции молекул газа с поверхности вакуумной камеры, причем как при вылете с поверхности, так и при попадании на нее. Кроме того, часть фотонов отражается и рассеивается по всей поверхности вакуумной камеры. В результате, даже в лабораторных экспериментах по изучению десорбции под действием СИ, так или иначе, участвует вся поверхность вакуумной камеры [8]. Это значительно затрудняет интерпретацию и сравнение полученных данных. Однако накопленный опыт позволяет выявить интегральные параметры этого сложного явления, необходимые для расчета и проектирования ускорителей.

Основной характеристикой десорбции под действием фотонов является среднее число молекул десорбированных одним фотоном η [молекул/фотон] – коэффициент фото-стимулированной десорбции. Тогда поток молекул со стенок можно записать как:

$$q = \eta \dot{\Gamma} / K, \quad (2)$$

где $\dot{\Gamma}$ – поток фотонов [фотон/(м·с)], $K \approx 2.4E20$ [1/(Па·м³)] – количество молекул в кубометре при комнатной температуре и давлении 1 Па.

Как правило, доминирующим десорбирующимся под действием СИ газом, является водород. Вторым по интенсивности является поток моно-оксида углерода (СО), составляющий 20 – 30 % от потока водорода. Но, поскольку сечение рассеяния релятивистских электронов пропорционально квадрату атомного номера, то доминирующим оказывается рассеяние на молекулах СО. Далее, для упрощения анализа, учитывается только парциальное давление СО.

Средний поток СИ, облучающий стенки вакуумной камеры накопителя СКИФ составляет $2E18$ [фотон/(м·с)] при номинальном токе электронного пучка 0.4А и энергии 3 ГэВ. Межполюсное расстояние в магнитных элементах 30мм. При технологическом зазоре 0.5мм и толщине стенок вакуумной камеры 1мм, внутренний диаметр составит 27мм. Таким образом, молекулярная проводимость по СО камеры единичной длины, составит:

$$u = \frac{\pi d^3}{12} \hat{v} = \frac{\pi d^3}{12} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \approx 0.0024 \left[\frac{M^4}{c} \right] \quad (3)$$

Прямой расчет показывает, что при среднем расстоянии между насосами 1 м, факторе $g = 1.6$, коэффициенте $k = 0.25$ и коэффициенте десорбции $5E-7$, среднее давление СО будет на требуемом уровне: $\approx 3E-7$ Па.

Известно, что начальные значения фото-десорбции могут быть на уровне 0.005 (для СО), т.е. значительно превышать требуемое значение $5E-7$. Однако интенсивность стимулированной десорбции уменьшается по мере накопления фотонной дозы по закону [9]:

$$\eta = \eta_0 \frac{1}{1 + \left(\frac{\Gamma}{\Gamma_{1/2}} \right)^\varepsilon}, \quad (4)$$

где η_0 – начальное значение коэффициента десорбции, Γ – фотонная доза [фотон/м], $\Gamma_{1/2}$ – фотонная доза [фотон/м], при которой коэффициент десорбции уменьшается в два раза от начального значения. При фотонных дозах $\Gamma > \Gamma_{1/2}$ коэффициент десорбции убывает по степенному закону с показателем степени ε . По многочисленным экспериментальным данным [9 - 19] показатель степени ε изменяется в пределах $2/3 \div 1$. Причем большим значениям ε соответствуют большие значения η_0 . Важно отметить, что при $\Gamma > \Gamma_{1/2}$ поток десорбированных молекул пропорционален $q \propto \dot{\Gamma}^{-\varepsilon} \dot{\Gamma} = \dot{\Gamma}^{1-\varepsilon}$. Т.е. зависимость от интенсивности фотонного потока оказывается весьма слабой даже при $\varepsilon=2/3$ (на различных участках, где фотонные потоки отличаются в 8 раз, газовая нагрузка будет отличаться всего в 2 раза). Кроме того, в гладкой камере, усреднению фотонного потока значительно способствует высокие значения коэффициентов отражения фотонов с энергиями < 1 КэВ при малых углах падения. Эти два обстоятельства в полной мере оправдывают принятое в данной статье усреднение потока десорбирующихся молекул со стенок вакуумной камеры, облучаемой прямыми, пере-отраженными, диффузно-рассеянными фотонами СИ, а также фотоэлектронами.

Анализ многочисленных экспериментальных данных [9 - 19], а также динамики давления в ВЭППЗ (ИЯФ СО РАН) при накоплении фотонной дозы до $3E25$ [фотон/м] [20], позволяет заключить, что при практически наихудшем значении $\varepsilon = 2/3$, требуемая степень тренировки (т.е. $\eta = 5E-7$) будет достигнута при накоплении фотонной дозы $1E25$ [фотон/м]. Для накопления такой дозы в СКИФ требуется не многим меньше двух месяцев непрерывной работы при номинальном токе 0.4 А. Очевидно, что в начале тренировки невозможно работать с номинальным током из-за интенсивной газовой нагрузки (короткого времени жизни). Для расчета реального времени, примем, что во время тренировки ток электронного пучка должен быть таким, чтобы радиационный фон, пропорциональный потерям релятивистских частиц за единицу времени, не превышал номинальное значение. Потери релятивистских частиц из-за рассеяния на остаточном газе пропорциональны их току и давлению остаточного газа. Соответственно, произведение $I \cdot P$ не должно превышать $I_n \cdot P_n = 1.3E-7$ [А·Па]. Тогда допустимый ток во время тренировки определяется соотношением: $I \cdot P = const = 1.3E-7$ [А·Па]. Это соотношение, с учетом: $\dot{\Gamma} = I \cdot 5E18$, и допущения $\Gamma \gg \Gamma_{1/2}$, позволяет проинтегрировать систему уравнений (1-4) и вычислить время тренировки накопителя СКИФ, необходимое для выхода на номинальный ток 0.4 А:

$$t \approx \frac{\Gamma_{1/2}}{5 \cdot 10^{18}} \cdot \frac{I_n^{\frac{1}{\varepsilon}-1}}{1-\varepsilon} \left[\frac{5 \cdot 10^{18}}{K} \cdot \frac{g \eta_0 L^2}{P_n \cdot 12 u (1-k)} \right]^{\frac{1}{\varepsilon}} [c]$$

В таблице 1 приведены исходные данные для вычисления времени тренировки.

Таблица 1
Исходные данные для проведения тренировки

Параметр	Значение
Номинальный ток, I_n [А]	0.4
Номинальное давление по СО, P_n [Па]	$3.3E-7$
Средний номинальный поток СИ, $\dot{\Gamma}$ [фотон/(с·м)]	$5E18 \cdot I_n = 2E18$
Внутренний диаметр вакуумной камеры, d [м]	0.027
Молекулярная проводимость вакуумной камеры единичной длины по СО, u [м ⁴ /с]	0.0024
Среднее расстояние между насосами, L [м]	1
Эффективность расположения насосов, g	1.6
Коэффициент использования насосов, k	0.25
Начальный коэффициент десорбции по СО, η_0 [молекула/фотон]	0.005
$\Gamma_{1/2}$ [фотон/м]	$1E19$
Показатель степени, ε	$2/3$

Расчет показывает, что время тренировки вакуумной камеры СКИФ, составляет около 2.5 месяцев, что является вполне приемлемым. Если допустить более жесткий режим тренировки, а именно: трехкратное превышение радиационного фона из-за потерь частиц на остаточном газе, то время тренировки возможно сократить примерно на 20%. В этом случае тренировка фактически разбивается на два этапа: выход на номинальный ток 0.4 А и давление СО $1E-6$ Па (примерно полмесяца) и выход на номинальное давление $3.3 \cdot E-7$ Па при постоянном номинальном токе (примерно полтора месяца). Следует учитывать, что эти оценки получены при наиболее пессимистичном значении показателя степени в выражении (4). Отметим сильную зависимость времени тренировки от диаметра вакуумной камеры и среднего расстояния между насосами. Действительно, при $\varepsilon=2/3$, и учетом (3), получим:

$$t \propto \frac{L^3}{d^{4.5}}$$

Требование на эффективную быстроту откачки портов с насосами:

$$S = \frac{5 \cdot 10^{18} I_n \eta L}{k P_n K} \approx 0.055 \text{ м}^3/\text{с} = 55 \text{ л/с}$$

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ НАКОПИТЕЛЯ

Накопитель СКИФ поделен на 16 супер-периодов, каждый из которых состоит из 7-и гирдеров. Схема супер-периода накопителя показана на рис. 1. Среднее расстояние между вакуумными портами с насосами составляет примерно 1 м, общее количество портов – 24 шт.

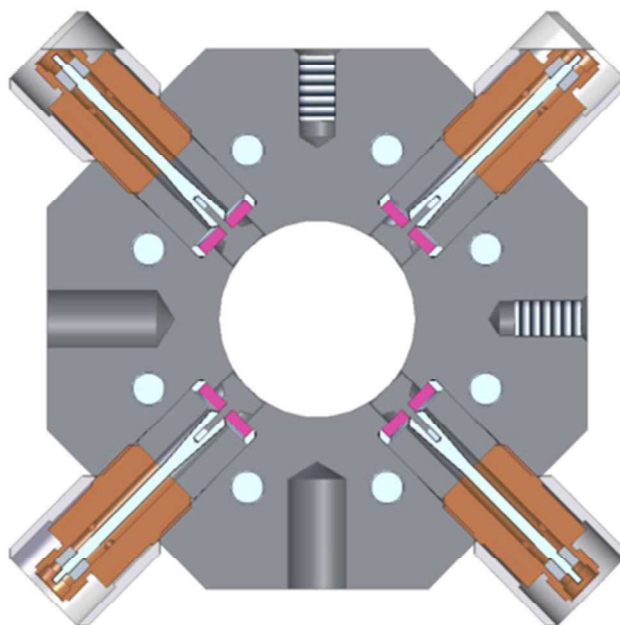


Рис.1. Схема суперпериода накопителя СКИФ

В порты откачки устанавливаются геттерные насосы в виде картриджей с нагревателями и ионно-геттерные насосы. В целом порт откачки образует комбинированный насос, являющийся модификацией насосов, предлагаемых в [7]. Эффективная скорость откачки порта по СО должна быть не менее 55 л/с при поглощении количества газа, составляющего до 80% от сорбционной емкости геттерного насоса. Сорбционная емкость по СО: не менее 0.1 Па·м³. Начальное значение быстроты откачки геттерного насоса должна составлять не менее 800 л/с по СО. Быстрота откачки ионно-геттерного насоса должна быть не менее 10 л/с по аргону.

Как уже было сказано, особое внимание уделяется подбору материалов для изготовления вакуумных элементов, конструкциям откачных портов и соединительных элементов для минимизации резистивных и геометрических импедансов. Ступеньки и щели во фланцевых соединениях и сильфонных узлах вакуумных камер, вследствие их большого количества, могут быть значительными источниками импедансов. Из этих соображений в

качестве фланцевого вакуумного соединения были выбраны фланцы конструкции Matsumoto-Ohtsuka (фланцы МО-типа) [21, 22]. Данное соединение успешно используется на коллайдере SuperKEKB в Японии. Схема фланцевых соединений вакуумных камер SuperKEKB показана на рис. 2 [23]. Исходя из схемы, видны основные преимущества данного типа соединений по сравнению с соединениями типа ConFlat: отсутствие щелей и ступенек, высокая проводимость по току между фланцем и уплотнением с внутренней стороны вакуумной камеры.

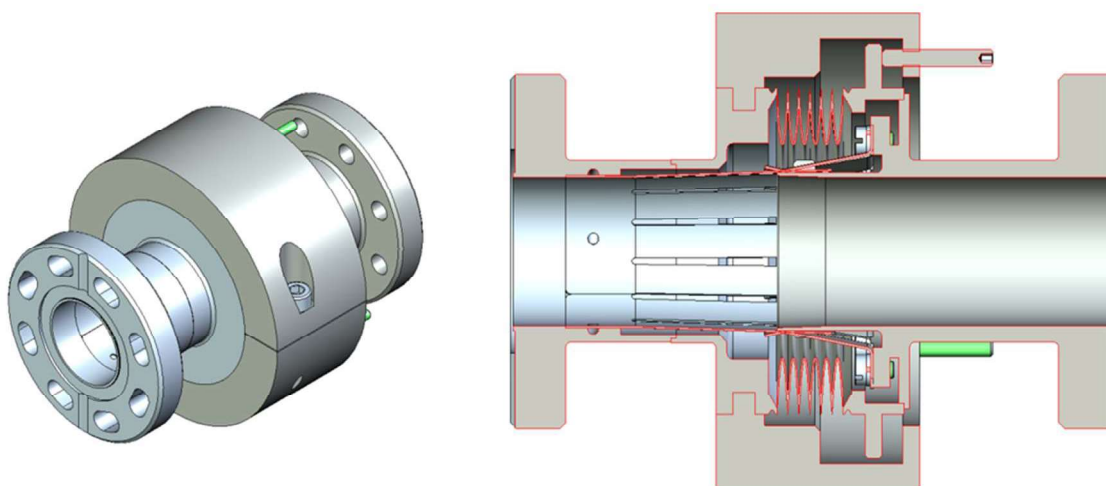


Рис.2. Схема фланцевого соединения конструкции Matsumoto–Ohtsuka

В качестве материала фланцев может использоваться алюминиевый сплав или нержавеющая сталь, материал уплотнения – медь или алюминиевый сплав. Для датчиков положения пучка возможен вариант применения титана в качестве материала фланцев. В случае необходимости прогрева фланцевого соединения материал крепежа должен быть согласован с материалом фланцев по коэффициенту температурного расширения (КТР). В накопителе SKIF применяются алюминиевые вакуумные камеры. Фланцы камер сделаны из алюминиевого сплава. Использование фланцев из нержавеющей стали для сварки с камерой потребует применения биметалла: нержавеющая сталь – алюминий, что экономически не выгодно. Крепеж из алюминиевого сплава требует более деликатного обращения (обязательное применение динамометрических ключей при затяжке) чем стандартный крепеж из нержавеющей стали. Поэтому для монтажа вакуумных камер был выбран стандартный крепеж. Но для компенсации разности КТР крепежа и фланцев были введены кольца из титана со стороны фланцев из алюминиевого сплава (см. рис.3).

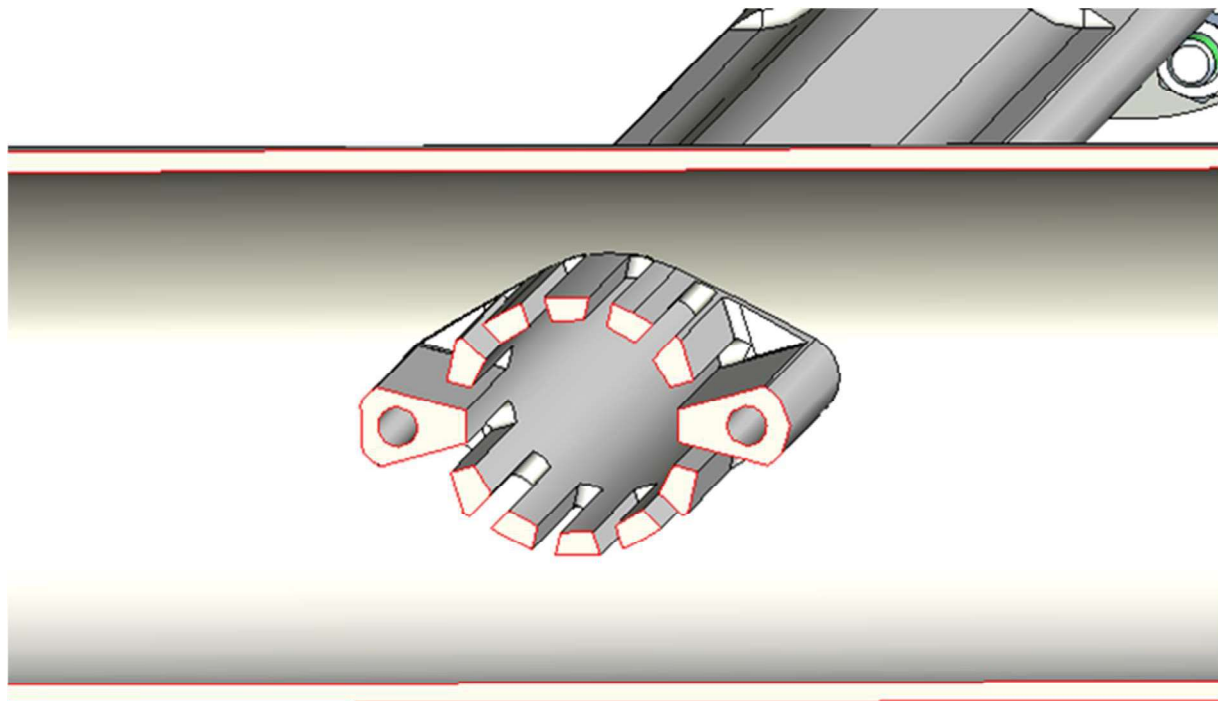


Рис.3. Схема конструкции фланцевого соединения вакуумной камеры накопителя СКИФ

В этом случае толщина фланца была уменьшена, чтобы с учетом кольца, общая толщина значительно не увеличивалась. Применение титановых колец позволяет использовать такие комбинации материалов фланцев как: алюминий – алюминий, нержавеющая сталь – алюминий, титан – алюминий. Рассчитать оптимальную толщину титанового кольца можно по формуле:

$$H_{Ti} = H_{Al} \frac{\alpha_{S.S.} - \alpha_{Al}}{\alpha_{Ti} - \alpha_{S.S.}}$$

где H – толщина и α – КТР соответствующего материала, S.S. – нержавеющая сталь.

На рис. 4 показана вакуумная камера со стандартным откачным портом. Фланцы DN63 откачного порта имеют стандарт ConFlat, но выполнены из алюминиевого сплава. Фланцы имеют стандартный нержавеющий крепеж и, компенсирующее КТР, титановое кольцо. Данная вакуумная камера проходит через квадрупольный и секступольный магниты. К откачным портам подключается вакуумное оборудование: насосы, вакуумметры или анализаторы остаточных газов.

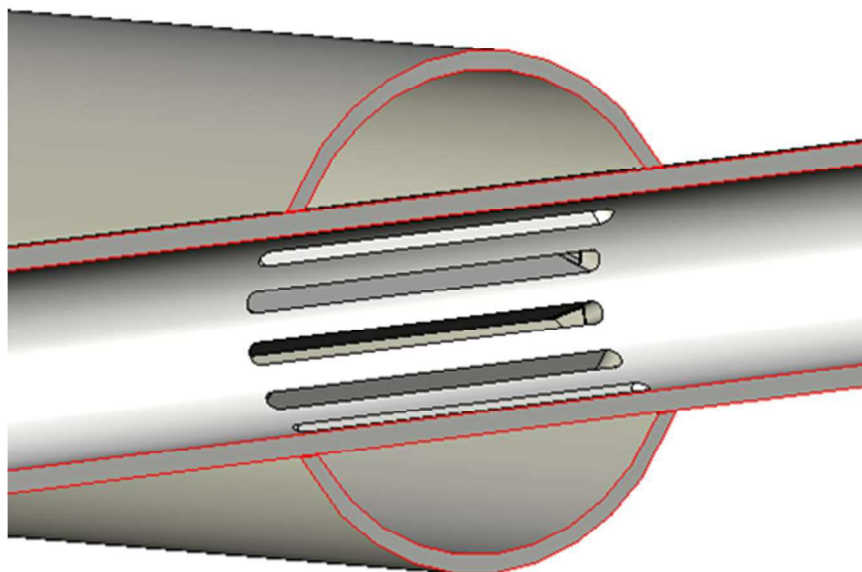


Рис. 4. Схема устройства вакуумной камеры со стандартным откачным портом

Основной профиль вакуумной камеры показан на рис. 5. Камера выполнена из алюминиевого профиля, полученного методом экструзии. Камера имеет два канала в горизонтальной плоскости. Один канал используется для водяного охлаждения, второй — может быть использован для прокладки нагревающего кабеля. В магнитных элементах основной профиль вакуумной камеры механически дорабатывается в соответствии с геометрией полюсов магнитных линз (см. рис. 6 и 7).



Рис. 5. Внешний вид основного профиля вакуумной камеры

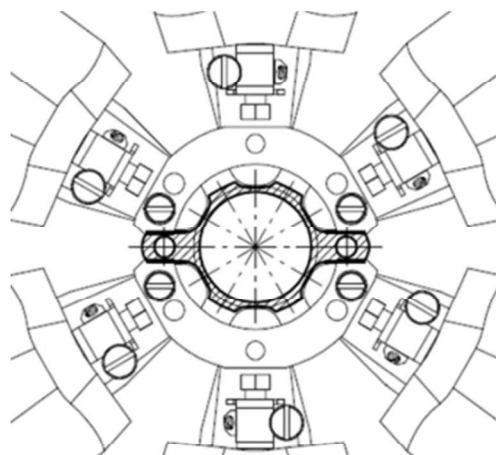


Рис. 6. Схема расположения профиля вакуумной камеры в квадрупольных магнитах

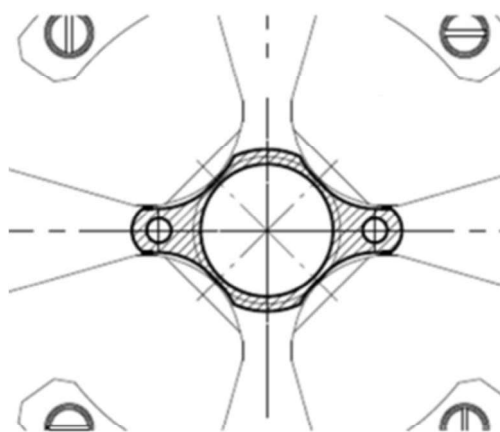


Рис. 7. Схема расположения профиль вакуумной камеры в секступольных магнитах

Между некоторыми магнитными элементами накопителя недостаточно пространства для размещения стандартных откачных портов. Для этих мест разработаны вакуумные камеры с малогабаритными откачными портами. Пример такой камеры показан на рис. 8.

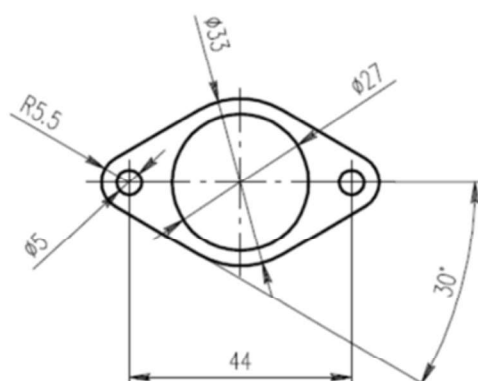


Рис. 8. Схема вакуумной камеры с малогабаритными портами откачки

Особое внимание уделяется месту стыковки вакуумной камеры с патрубком откачного порта. Вакуумная камера вместе с каналами охлаждения непрерывно проходят сквозь патрубок с сохранением своего профиля. Внутри патрубка в стенках пучковой камеры

сделаны отверстия овальной формы под откачку (см. рис. 9 и 10). Геометрия отверстий должна минимизировать вносимый импеданс.

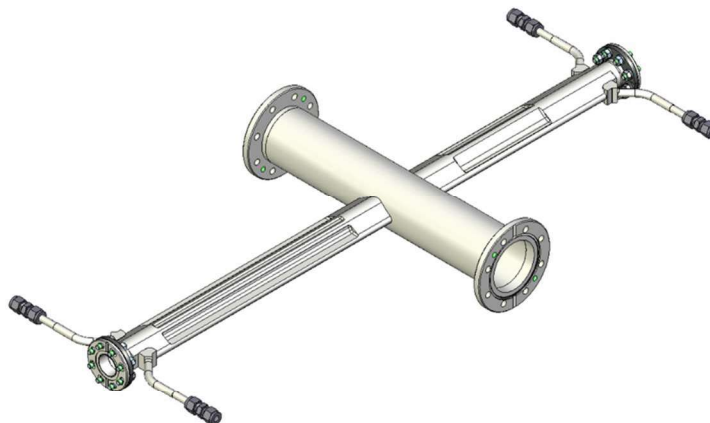


Рис.9. Внешний вид продольного сечения вакуумной камеры внутри патрубка откачного порта

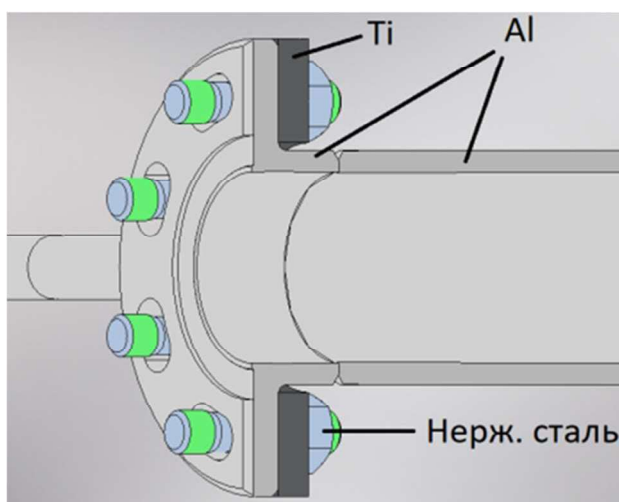


Рис.10 Схема поперечного сечения вакуумной камеры внутри патрубка откачного порта

Для компенсации температурных расширений, неточностей изготовления, возможности монтажа и выставки вакуумных камер применяются сильфонные механические компенсаторы с пониженным волновым сопротивлением. Внешний вид и конструкция компенсатора узла показаны на рис. 11. В конструкции применяется полосковый подпружиненный скользящий контакт. Для предотвращения выпадения полосок из рабочих мест применяются ограничители продольного и поперечного хода сильфона. Продольный ход составляет ± 5 мм.

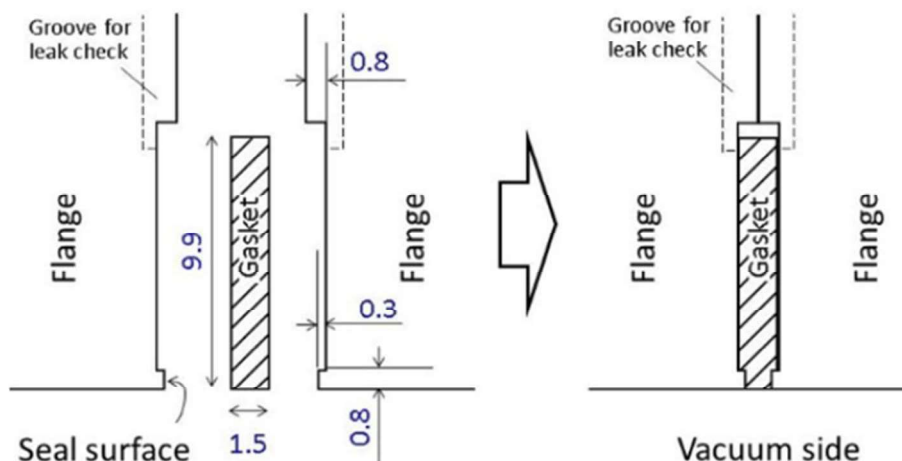


Рис. 11. Схема продольного сечения механического компенсатора

Количество механических компенсаторов в супер-периоде ввиду минимизации импеданса строго ограничено и составляет всего 2 штуки. Механические компенсаторы также устанавливаются между супер-периодами. Среднее расстояние между узлами составляет 8 м. В пределах данного расстояния установлено несколько камер с откачными портами и несколько датчиков положения пучка (ВРМ) между камерами. Откачные порты и ВРМ монтируются на выставочные опоры, позволяющие произвести точную регулировку поперечного положения установленных на них элементов. После регулировки опоры жестко фиксируются в поперечном направлении, а в продольном имеют свободный ход в пределах ± 5 мм. Данная конструкция обеспечивает подвижность в продольном направлении всей собранной вакуумной системы (с откачными портами и ВРМ) как единой цельной камеры в пределах между двумя механическими компенсаторами. Датчики положения пучка (см. рис. 12) изготавливаются из титана. Электроды впаиваются вместе с керамическими изоляторами непосредственно в корпус методом активной пайки твердым припоем.

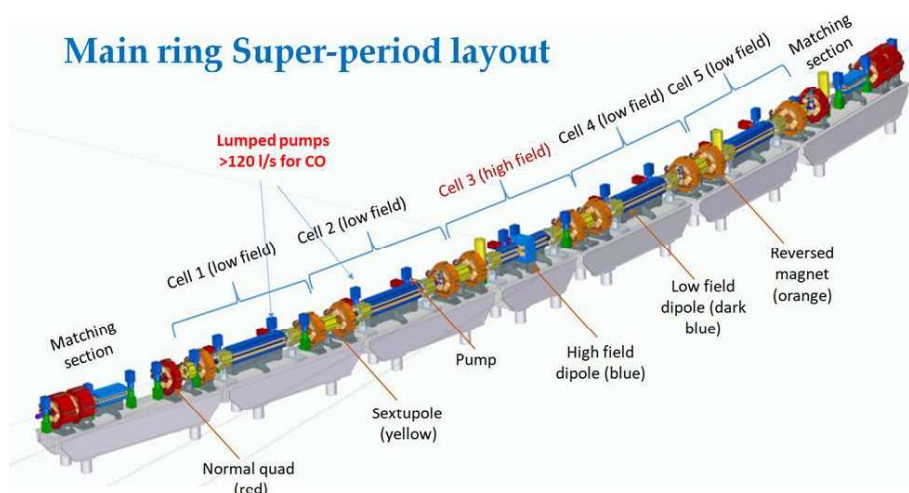


Рис. 12. Схема расположения датчика положения пучка (ВРМ) с паяными электродами

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана концепция вакуумной системы накопительного синхротрона СКИФ, позволяющая составить техническое задание на проектирование. Доказано, что при

среднем расстоянии между сосредоточенными портами откачки 1м в арках накопителя, необходимое время на тренировку вакуумных камер пучка составит не более 2.5 месяцев. Созданы модели основных элементов вакуумной системы, включая специализированные фланцевые соединения и диагностические устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. ЦКП «СКИФ» <https://srf-skif.ru/>
2. Развитие физики и технологии ускорителей заряженных частиц / Ред.-сост. Б.Ю. Шарков, И.Н. Мешков. — М.: РАН, 2021. — 140 с. ISBN 978-5-907366-27-5
3. R. Kersevan, Proc. EPAC 2000, Vienna, <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/e00/PAPERS/THP5B11.pdf>.
4. Al-Dmour, E., Ahlback, J., Einfeld, D., Tavares, P. F. & Grabski, M. (2014). J. Synchrotron Rad. 21, 878–883. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000341687000005?SID=EUW1ED0CAFIsBDbsrKM8FCuL6daMs>
5. R.M. Seraphim, et al., Proc. of IPAC2015, p. 2744 (2015).
6. I.R. Collins, V.L. Ruzinov, O.B. Malyshev, V.V. Anashin, R.V. Dostovalov, N.V. Fedorov, A.A. Krasnov. A photodesorption study of a TiZrV coated stainless steel vacuum chamber" - EPAC-2002, Paris, France, June 2002, Proc. of EPAC-2002, pp. 2550-2552.
7. Официальный сайт фирмы SAES Getters <https://www.saesgetters.com/products-functions/products/neg-pumps%26vacuum-solutions>
8. Под ред. Г.Л.Саксаганского: Сверхвысокий вакуум в радиационно-физическом аппаратостроении – М.: “Атомиздат”, 1976.
9. А.А.Краснов Исследование и прогнозирование динамической плотности остаточных газов в вакуумных камерах современных ускорительно-накопительных комплексов”, – диссертация кандидата физико-математических наук, Новосибирск, 2012.
10. Oleg V. Malyshev. Vacuum in Particle Accelerators: Modelling, Design and Operation of Beam Vacuum. Wiley VCH, Germany (2019). ISBN-10: 3527343024, ISBN-13: 978-3527343027.
11. T.Kobari, H.J.Halama. Photon stimulated desorption from a vacuum chamber at the National Synchrotron Light Source. J. Vac. Sci. Technol. vol. 5 , Issue 4, pp. 2355 - 2358 (1987).
12. S. Ueda, M. Matsumoto, T. Kobary, T. Ikeguchi, M. Kobayashi, Y. Hori Photodesorption from stainless steel, aluminum alloy and oxygen free copper test chamber. Vacuum, vol. 41, N 7-9, pp. 1928-1930 (1990).
13. Honry J. Halama, Conrad L. Foerster. Comparison of photodesorption yields from aluminum, stainless and Cu-plated beam tubes. Vacuum, vol. 42, N 3, pp. 185-188 (1991).
14. C. L. Foerster et al., J. Vac. Sci. Technol., A13 (1995) 581.
15. O. Grobner, A.G. Mathewson, P.C. Marin. Gas desorption from an OFHC copper vacuum chamber by synchrotron radiation photons. CERN Report: CERN–AT-93-12-VA, 1993.
16. O. Gröbner et al., J. Vac. Sci. Technol., A12 (1994) 846.
17. N.Ota, K.Kanazawa, M.Kobayashi, H.Ishimaru. Outgassing from aluminum surface layer induced by synchrotron radiation. J. Vac. Sci. Technol. A14(4), 1996.
18. Y. Suetsugu and K. Kanazawa, Proc. PAC1993, Washington D.C., May 17-20 (1993) 3860.

19. Gao-Yu Hsiung, Chia-Mu Cheng, Reza Valizadeh. Measurement of the Photon Stimulated Desorption for Various Vacuum Tubes at a Beam Line of TLS, JACoW IPAC2022 (2022) ТНРОТК037, DOI: 10.18429/JACoW-IPAC2022-ТНРОТК037
20. С.И.Мишнев. ИЯФ СО РАН. Неопубликованные материалы.
21. Y. Suetsugu, M. Shirai, and M. Ohtsuka, "Application of a Matsumoto-Ohtsuka-type vacuum flange to beam ducts for future accelerators", J. Vac. Sci. Technol. A, vol. 23(6), pp. 1721-1727, 2005.
22. K. Shibata, Y. Suetsugu, T. Ishibashi, K. Kanazawa, M. Shirai, S. Terui, and H. Hisamatsu, "COMMISSIONING STATUS OF SuperKEKB VACUUM SYSTEM", High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 305-0817 Tsukuba, Ibaraki, Japan
23. http://mo-ohtsuka.co.jp/features_of_moflange.html

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В.В. Анашин - кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск; e-mail: v.v.anashin@inp.nsk.su

Г.А. Гусев – ведущий инженер-конструктор ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск; e-mail: g.a.gusev@inp.nsk.su

А.А. Жуков – научный сотрудник ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск; Центр коллективного пользования Сибирский кольцевой источник фотонов Федерального государственного бюджетного учреждения науки ФИЦ «Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук», г. Новосибирск; e-mail: a.a.zhukov@inp.nsk.su

А.А. Краснов – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск; Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск; Центр коллективного пользования Сибирский кольцевой источник фотонов Федерального государственного бюджетного учреждения науки ФИЦ «Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук», г. Новосибирск; e-mail: a.a.krasnov@inp.nsk.su

В.С. Кузьминых – старший научный сотрудник ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск; e-mail: v.s.kuzminikh@inp.nsk.su

П.А. Пиминов – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск; Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск; Центр коллективного пользования Сибирский кольцевой источник фотонов Федерального государственного бюджетного учреждения науки ФИЦ «Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук», г. Новосибирск; e-mail: p.a.piminov@inp.nsk.su

А.М. Семенов - кандидат технических наук, доцент; старший научный сотрудник ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск; Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск. e-mail: a.m.semenov@inp.nsk.su