

ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА СИНХРОТРОНА НА 300 Мэв

А. Г. ВЛАСОВ, В. П. ПОНОМАРЕВ

Проблема сооружения вакуумных систем электронных ускорителей и получение в вакуумной камере достаточно низкого давления представляет собой довольно сложную задачу. От решения этой проблемы зависят эксплуатационные характеристики и эффективность работы ускорителя.

Требования к вакуумным системам вообще и к вакуумным системам ускорителей в частности, к материалу ускорительных вакуумных камер, к их конструкции, к необходимому разряжению, создаваемому в камере, достаточно полно описаны в работах [1—4].

Электронный синхротрон на 300 Мэв, сооруженный в институте, представляет собой ускоритель с мягкой фокусировкой с прямолинейными участками. Воздушный зазор электромагнита выбран небольшим и имеет размеры 80×200 мм. Все это налагает специфические требования на вакуумную систему данного синхротрона. Основными элементами вакуумной системы синхротрона являются: вакуумная камера, откачная система и система управления, блокировки и сигнализации (УБС).

1. Вакуумная камера

Размеры поперечного сечения и радиус камеры являются производными межполюсного пространства электромагнита и радиуса равновесной орбиты ускорителя. Поэтому при проектировании вакуумной камеры синхротрона было задано: наружный аксиальный размер сечения камеры $2b$ должен быть не больше 70 мм, внутренний радиальный размер сечения камеры $2a_v$ — не меньше 185 мм, средний радиус камеры $r_{\text{ср}} = 967,5$ мм, длина прямолинейных участков камеры $L_{\text{пр}} = 600$ мм при угле квадранта $\gamma_{\text{кв.}} = 83^\circ 30'$.

Исходя из требований, предъявляемых к материалу ускорительных камер [3], предложено камеру синхротрона изготовить из фарфора. Расчет механической прочности камеры показал, что в наиболее напряженном месте сечения камеры толщина фарфора должна быть не менее 17 мм и в наименее напряженном — 7 мм [5]. Если сделать камеру с равномерной толщиной стенки, равной 17 мм, то азимутальный внутренний размер сечения будет равен всего 36 мм, и межполюсное пространство электромагнита будет использовано весьма неэффективно. Поэтому спроектировано сечение камеры с различной толщиной стенок — по аксиальной оси — 7,5 мм и по радиальной оси — 18 мм. Та-

ким образом, сечение камеры, изображенное на рис. 1, представляет собой овал с размерами внутренними — 55×185 и наружными — 70×221 мм. Расчет такого сечения, а в дальнейшем и испытания показали достаточную механическую прочность спроектированной и изготовленной фарфоровой камеры.

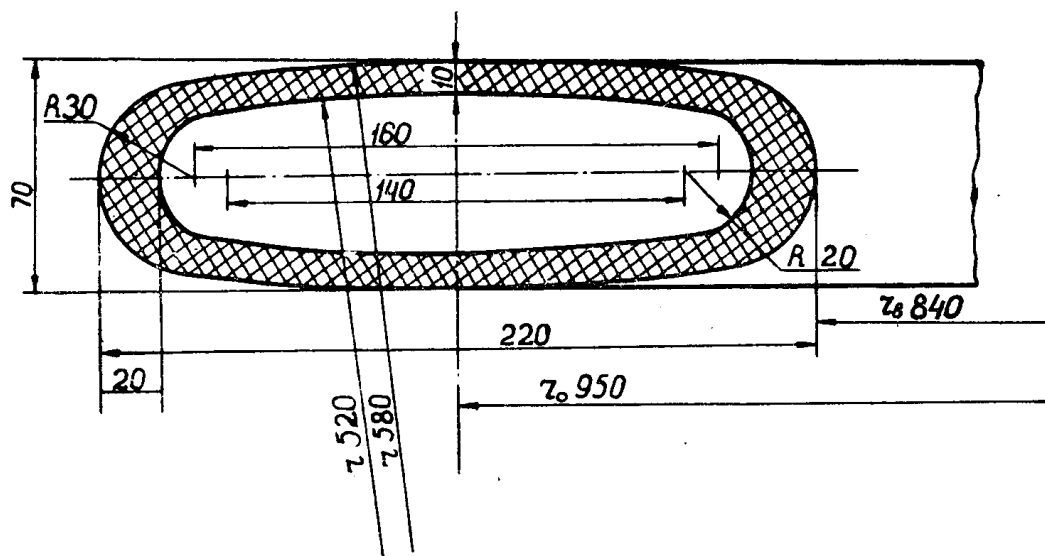


Рис. 1. Поперечное сечение вакуумной камеры

Изготовить камеру цельной ввиду значительных ее размеров не представляется возможным. Поэтому камера изготовлена из отдельных фарфоровых секторов. Сектора склеены в квадранты, которые в свою очередь соединяются друг с другом с помощью фланцев. Каждый квадрант камеры содержит по 5 криволинейных секторов с патрубками для размещения приспособлений индикации пучка ускоряемых электронов, мишеней и т. д. В первом квадранте расположен криволинейный сектор с патрубком по касательной к орбите, через который выводится излучение от мишени. Прямолинейные участки камеры выполнены из фарфоровых секций с патрубками для размещения индикационных устройств и для соединения с откачной системой. Участок инжекции склеен из 2-х секций специальной формы и является отдельной частью камеры, расположенной на прямолинейном участке электромагнита. Второй прямолинейный участок представляет также отдельную часть камеры, снабжен секцией с электродами и служит в качестве ускоряющего участка, соединяемого с высокочастотным генератором. Два других прямолинейных участка разделены на две части каждый, и эти части приклеены к соседним квадрантам. Такое распределение секторов позволило сделать всего 6 фланцевых соединений камеры вместо 8. Общий вид камеры синхротрона представлен на рис. 2.

Сектора камеры друг с другом склеены клеем БФ-4 по технологии, описанной в работе [3]. Фланцевые соединения квадрантов и прямолинейных участков, изображенные на рис. 3, изготовлены из дюралюминия и уплотняются при сборке вакуумной резиной. Ко всем патрубкам секторов и секций так же приклеены дюралюминиевые фланцы, закрываемые крышками, на которых смонтированы индикационные приспособления, или заглушки. Крышки, штоки индикаторов и световоды уплотнены вакуумной резиной. Уплотнение штоков скользящее, и они имеют возможность перемещаться по радиальному направлению камеры.

Внутренняя поверхность секторов камеры покрыта проводящим слоем. Требования к проводящему покрытию камер ускорителей электронов подробно описаны в работах [3, 6].

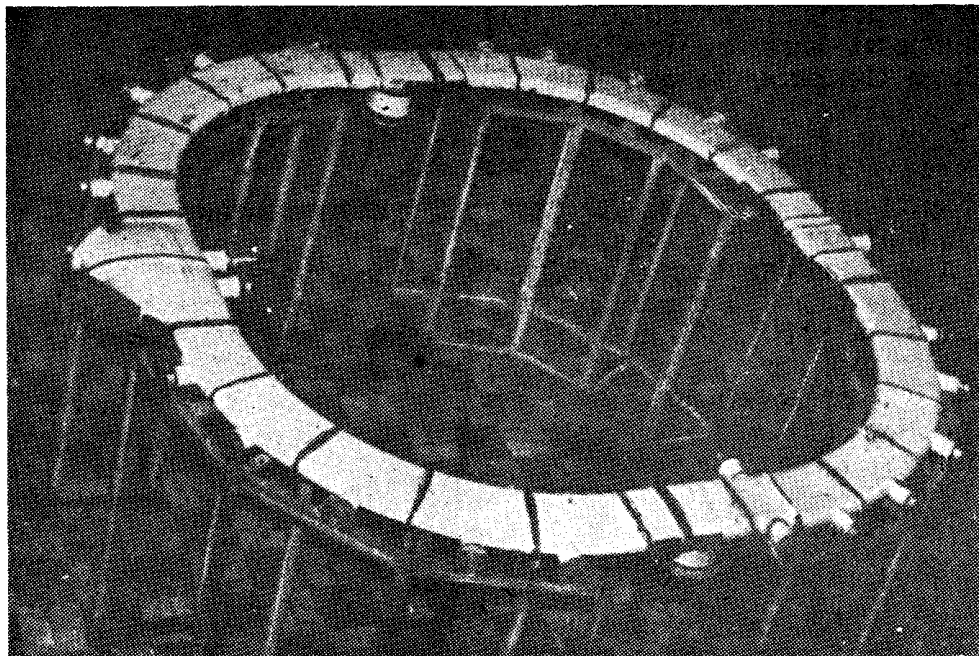


Рис. 2. Вакуумная камера на стенде

В нашем случае секторы покрыты аквадагом с удельным сопротивлением $30\text{--}50\text{ ом/см}^2$. Вывод проводящего слоя осуществлен полосками вожженного серебра с обеих торцов секторов. Соединение полосок произведено медной фольгой, припаяваемой мягким припоем к серебряным полоскам.

Чтобы электроны в процессе ускорения не терялись из-за рассеяния на остаточном газе, в камере необходимо создать высокий вакуум.

Рабочее давление в камере описываемого синхротрона согласно расчетам, проведенным по методике, описанной в работах [7, 8], должно быть не больше $4\text{--}5 \cdot 10^{-6}\text{ тор}$.

2. Откачная система

Для получения высокого вакуума в камерах ускорителей обычно используются диффузионные паромасляные насосы, работающие последовательно с форвакуумными. В последнее время вместо пароструйных насосов все чаще и чаще начинают применяться ионно-сорбционные насосы, так как они не засоряют камеру парами рабочей жид-

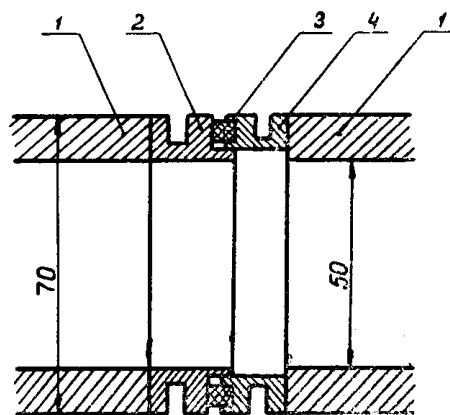


Рис. 3. Фланцевое соединение квадрантов и прямолинейных участков. 1 — фарфоровые секции; 2 и 4 — дюралюминиевые фланцы; 3 — кольцо из вакуумной резины

кости, а это очень важно при длительной работе ускорителя. Более полное сравнение диффузионных и ионно-сорбционных насосов, их недостатков и достоинств при применении для откачки камер ускорителей описано в работе [9].

В то время, когда проектировалась и сооружалась откачная система синхротрона на 300 Мэв, мы не имели соответствующих ионно-сорбционных насосов. Поэтому основная откачная система синхротрона была спроектирована и изготовлена на диффузионных паромасляных насосах.

Камера синхротрона имеет прямолинейные участки, два из которых заняты под инжекцию и резонатор, два свободны. На двух свободных прямолинейных участках размещены откачные секции, к которым через промежуточные элементы (патрубок, затвор, ловушка и т. д.) присоединяются диффузионные насосы.

Расчет откачной системы синхротрона, проведенные по методике, описанной в работе [3], показали, что необходимая скорость откачки диффузионных насосов должна быть не меньше 340 л/сек.

Чтобы обеспечить рабочий вакуум в самых удаленных точках камеры от входа диффузионных насосов, равный $5 \cdot 10^{-6}$ тор, необходимо иметь предельное разряжение насосов $1,9 \cdot 10^{-6}$ тор, так как перепад давления от насосов до этих точек согласно расчету равен $3,1 \cdot 10^{-6}$ тор.

Для откачки камеры нами выбраны высоковакуумные агрегаты ВА-05-1, имеющие скорость откачки на входе насоса 500 л/сек. Но эти агрегаты создают предельное разряжение на входе насоса $3 \cdot 10^{-6}$ тор, что для откачки камеры синхротрона недостаточно. При откачке одними агрегатами в самой удаленной точке камеры получим вакуум, равный $6,1 \cdot 10^{-6}$ тор, что недопустимо.

Для увеличения предельного разряжения агрегатов и для предотвращения попадания паров масла от диффузионных насосов в камеру обычно применяют вымораживающие ловушки. Применение вымораживающих ловушек, охлаждаемых жидким азотом, позволяет получить на выходе агрегата ВА-05-1 предельное разряжение $5 \cdot 10^{-7}$ тор. Тогда рабочий вакуум будет равен $3,6 \cdot 10^{-7}$ тор, что удовлетворяет условиям, но эксплуатация вакуумной системы при использовании ловушек значительно усложняется.

Нами в качестве вымораживающих ловушек использованы термоэлектрические ловушки типа ТВЛ-500. Применение этих ловушек предотвращает попадание паров масла в камеру, но не дает увеличения предельного разряжения агрегатов. Поэтому вблизи инжекционного и резонаторного прямолинейных участков, т. е. вблизи самых удаленных точек камеры от мест откачки к патрубкам секторов присоединено два титановых ионно-сорбционных насоса с предельным разряжением $7-8 \cdot 10^{-7}$ тор и производительностью 40 л/сек каждый. Эти насосы разработаны и изготовлены в нашей лаборатории, и конструкция их описана в работах [9, 10].

Установка титановых ионно-сорбционных насосов позволила получить в наиболее удаленной точке камеры давление $3-4 \cdot 10^{-6}$ тор. Усложнение эксплуатации вакуумной системы при использовании дополнительных титановых насосов весьма незначительно.

Для создания предварительного разряжения в камере и на входе диффузионных насосов обычно используются бустерные насосы в паре с форвакуумными или одни форвакуумные насосы. Расположение и число форвакуумных насосов выбирается из конструктивных соображений и удобства эксплуатации. Но при этом необходимо, чтобы фор-

вакуумная система обеспечивала на входе агрегатов ВА-05,1 давление не выше $7,5 \cdot 10^{-2}$ тор.

В нашем случае для откачки двух высоковакуумных агрегатов используется единая форвакуумная система, изготовленная из труб нержавеющей стали диаметром 50 мм. Она соединена с насосами через вентили. Уплотнением служит вакуумная резина. В качестве форвакуумного насоса использован один насос типа ВН-1, который позволяет создать в камере и на входе диффузионных насосов предварительное разряжение не хуже $2 \cdot 10^{-2}$ тор в течении 15—20 минут.

Полная схема вакуумной системы синхротрона приведена на рис. 4.

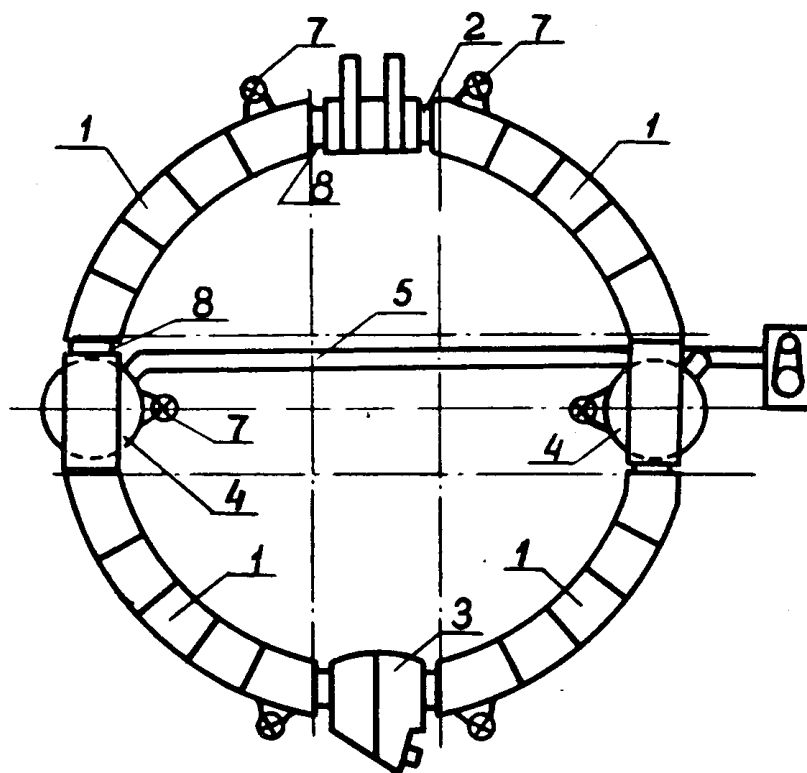


Рис. 4. Общая схема вакуумной системы синхротрона. 1 — квадранты камеры; 2 — резонаторный участок; 3 — инжекционный участок; 4 — высоковакуумные агрегаты ВА-0,5-1; 5 — форвакуумный трубопровод; 6 — форвакуумный насос ВН-1; 7 — датчики для измерения вакуума; 8 — фланцевые соединения квадрантов и прямолинейных участков

Высокие требования, предъявляемые к надежности работы всех узлов синхротрона, в частности к вакуумной системе, вызывают необходимость автоматического управления питанием насосов, а также непрерывного контроля за их работой и за рабочим давлением в камере. Для этих целей спроектирована и изготовлена схема питания и УБС вакуумной системы, подробное описание которой дано в отдельной статье.

Здесь мы только отметим, что при осуществлении системы УБС было разработано и изготовлено вакуумное реле с рабочим диапазоном давлений $10^{-1} - 10^{-2}$ тор, описанное в работе [11], так как реле на указанный диапазон давлений нашей промышленностью не выпускается.

Измерение вакуума производится в нескольких точках камеры и на входе всех насосов манометрическими лампами ЛМ-2 и ЛТ-2, укрепляемыми в специальных грибковых вакуумных уплотнениях.

3. Наладка ускорительной камеры и вакуумной системы

Вакуумная ускорительная камера создает пространство, частично эвакуированное от газа, в котором осуществляется процесс ускорения электронов. Источниками остаточного газа и пара в ускорительной камере является натекание через неплотные соединения и газоотделение поверхности камеры и различной арматуры, помещенной в нее.

Целью наладки ускорительной камеры является обеспечение герметичности неразборных и разборных соединений камеры, а также уменьшение внутренней поверхности камеры.

Испытание ускорительной камеры разделяется на стендовое испытание и испытание непосредственно на ускорителе. При подготовке элементов камеры к испытанию проводятся следующие работы:

а) внутренние поверхности квадрантов и прямолинейных участков камеры, покрытые аквадагом, протираются мягкой тканью и обдуваются струей воздуха;

б) фланцы камеры, заглушки, приспособления индикации промываются растворителем (спирт, бензин, ацетон).

Источником значительного гажения в камере являются прокладки из вакуумной резины. Уменьшение их газоотделения достигается кипячением в 5% растворе КОН [2] в течение 30 минут с последующей промывкой дистиллированной водой и спиртом. Лучшие результаты получаются при вакуумной обработке резиновых прокладок. При такой обработке прокладки нагреваются до 100°C и откачиваются через азотную ловушку в течение 20 часов [12].

После указанной подготовки вакуумная камера собирается на испытательном стенде. Для испытания вакуумной камеры на герметичность и газоотделение собирается типовой вакуумной испытательный пост [13], состоящий из высоковакуумного агрегата типа ВА-05-1 с форвакуумным насосом РВН-20 и гелиевого течеискателя ПТИ-6.

Испытание ускорительной камеры ведется в два этапа:

1. Течеискателем определяют течи при откачке камеры на стенде. Течи в местах склейки устраняются покрытием шва клеем следующего состава: эпоксидная смола ЭД6—100 в. ч.; фарфоровый порошок—40—50 в. ч.; дибутилфтолат—10 в. ч.; полиэтиленполиамин—8 в. ч. Течи разборных узлов устраняются соответствующей затяжкой винтов. Полезно резиновые прокладки перед установкой слегка смазывать касторовым маслом. После этого камера испытывается на натекание и газоотделение по методике, описанной в работе [13]. Испытание на натекание и газоотделение камеры необходимо производить во время первой откачки, когда газоотделение максимальное. Подготовленная и испытанная на стенде вакуумная камера может быть смонтирована на ускорителе.

2. Второй этап испытаний камеры заключается в проверке течеискателем всех узлов сборки камеры. Обнаруженные течи также должны быть ликвидированы.

Мероприятия по подготовке откачной системы подобны наладке вакуумной ускорительной камеры. Течи в откачной системе также недопустимы. В откачной системе можно не определять суммарную величину газоотделения и натекания. Но до присоединения камеры к откачной системе определяют ее основной эксплуатационный пара-

метр предельный вакуум, который она может обеспечить за длительный период непрерывной работы.

Для нормальной работы ускорителя это давление должно быть $4-5 \cdot 10^{-7}$ тор. Подготовка высоковакуумных и форвакуумных насосов производится согласно инструкций заводов — изготовителей.

Общие вопросы подготовки и эксплуатации вакуумных насосов полно освещены в литературе [1, 2, 14, 17], и поэтому мы их не приводим.

Удобным критерием проверки нормальной работы вакуумной системы на ускорителе является остаточное давление, остающееся в камере после некоторого перерыва в работе. Так, после перерыва в работе на ~ 15 часов остаточное давление в камере при нормальном натекании и газоотделении должно быть не выше $3-6 \cdot 10^{-2}$ тор.

Длительная работа ускорителя показала хорошую надежность вакуумной системы. Рабочее давление в камере поддерживается на уровне $3-4 \cdot 10^{-6}$ тор.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вакуумное оборудование и вакуумная техника, под ред. А. Гутри и Р. Уокерлинга, ИЛ, 1955.
2. Б. И. Королев. Основы вакуумной техники. Госэнергоиздат, 1958.
3. А. Г. Власов, В. П. Пономарев, М. Т. Шивырталов, П. М. Щанин. Изв. ТПИ, т. 122, 99, 1962.
4. И. Ф. Малышев, А. В. Попкович и др. ПТЭ, № 4, 46, 1962.
5. А. Г. Власов. К механическому расчету прочности вакуумных камер. Отчет НИИ-0207, Томск, 1958.
6. В. П. Пономарев. Проводящие покрытия камер ускорителей. Отчет НИИ-01522/273, Томск, 1961.
7. А. Г. Власов. Изв. вузов «Физика», № 1, 20 1961.
8. А. Г. Власов. ЖТФ, XXXI, 613, 1961.
9. Электронные ускорители. Труды IV Межвузовской конференции, 384, Москва, 1964.
10. В. П. Пономарев. ПТЭ, 6, 196, 1963.
11. В. П. Пономарев. Вакуумное реле с диапазоном $10^{-1} - 5 \cdot 10^{-3}$ тор. Отчет НИИ-01520/274, Томск, 1961.
12. В. А. Каретников и др. Линейные ускорители ионов. Госатомиздат, 1962.
13. В. А. Ланис, Л. Е. Левина. Практические основы вакуумных испытаний. ГЭИ, 1955.
14. Дж. Ярвуд. Техника высокого вакуума, ГЭИ, 1960.
15. Р. Яккель. Получение и измерение вакуума. ИИЛ, 1952.
16. В. И. Кузнецов. Механические вакуумные насосы. ГЭИ, 1959.
17. Я. Грошковский. Технология высокого вакуума. ИИЛ, 1957.