

С34505

Б-188

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

941/2-72

24/10-72

9 - 6218



К.А. Байчер, В.И. Данилов, И.Б. Енчевич,
Б.Н. Марченко, И.Х. Ноздрин, Г.И. Селиванов

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

ПОВЫШЕНИЕ
НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ СИНХРОЦИКЛОТРОНА
НА 680 МЭВ
В РЕЗУЛЬТАТЕ МОДЕРНИЗАЦИИ
ЕГО ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СИСТЕМЫ

1972

9 - 6218

К.А. Байчер, В.И. Данилов, И.Б. Ёнчевич,
Б.Н. Марченко, И.Х. Ноздрин, Г.И. Селиванов

**ПОВЫШЕНИЕ
НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ СИНХРОЦИКЛОТРОНА
НА 680 МЭВ
В РЕЗУЛЬТАТЕ МОДЕРНИЗАЦИИ
ЕГО ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СИСТЕМЫ**

**Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА**

Успех проведения исследований в области экспериментальной ядерной физики при энергиях до 1 Гэв в значительной мере обязан устойчивой работе синхроциклотрона на 680 Мэв Лаборатории ядерных проблем. По уровню интенсивности, эксплуатационной надежности и технической оснащенной вспомогательными средствами этот ускоритель принадлежит к числу лучших экспериментальных устройств своего класса. Многие узлы этой уникальной физической установки доведены до состояния эксплуатационной надежности промышленных сооружений.

Ниже кратко подводится итог многолетней работы по совершенствованию одного из самых ответственных и вместе с тем наиболее уязвимых узлов синхроциклотрона - его высокочастотной системы.

В начальный период работы ускорителей типа синхроциклотрон, у которых изменение частоты ускоряющего поля достигается с помощью вращающегося конденсатора (вариатора частоты), было выяснено, что надежность работы ускорителей этого типа в основном определяется временем жизни механических устройств, осуществляющих привод ротора вариатора.

Опыт эксплуатации синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ показывает, что типичными процессами, приводящими к неисправностям высокочастотной системы ускорителя, являются следующие:

1. Электроэрозия шарикоподшипников, происходящая в результате протекания через них высокочастотных токов и приводящая к нарушению геометрической согласованности деталей ротора и статора вариатора;

2. Нагрев деталей, вращающихся в рассеянном магнитном поле и находящихся под воздействием высокочастотных токов, приводящий к ускоренному старению резиновых уплотнительных манжет, а также к повышению эмиссионной способности металлических поверхностей /3/;

3. Разложение паров масла на нагретых деталях и связанное с этим снижение изоляционных свойств вакуумных промежутков между токонесящими поверхностями, сопровождающееся возникновением разрядов /3/;

4. Распыление и перенос электрическим полем металла с нагретых металлических деталей высокочастотной системы на охлаждаемую поверхность керамических изоляторов.

Ниже приводится последовательный анализ перечисленных факторов, влияющих на работоспособность синхротрона.

Преждевременный выход из строя шарикоподшипников ротора вариатора может быть обусловлен двумя главными причинами: конструктивными особенностями ступицы ротора и сложными условиями работы всего узла в целом. Специфика работы шарикоподшипников ротора такова, что, помимо естественных для них статических нагрузок, они находятся под воздействием ряда дополнительных факторов, таких, как вакуум, магнитное поле, высокочастотный нагрев и электроэрозия рабочих поверхностей. Работа шарикоподшипников происходит в условиях пониженного теплообмена с окружающей средой и отсутствия принудительной циркуляционной смазки.

Последние два обстоятельства можно условно отнести к конструктивным особенностям данного вариатора, тогда как первые объективно менее связаны с конструкцией. В процессе эксплуатации ускорителя и по мере совершенствования других узлов неоднократно вставал вопрос о модернизации вариатора частоты. Наиболее красноречивым доводом в пользу необходимости такой модернизации являлся тот факт, что за период с 1954 г. и по настоящее время, т.е. за время, прошедшее с момента проведения реконструкции синхротрона на энергию 680 Мэв, мощность, отдаваемая высокочастотным генератором в резонансную систему ускорителя, возросла от 20 до 50 квт.

На основании данных, полученных при макетных измерениях высокочастотной системы синхроциклотрона, известно, что в вариаторе частоты рассеивается приблизительно около 50% мощности, вводимой в резонансную систему.

Увеличение мощности, отдаваемой в резонансную ВЧ систему ускорителя, на первом этапе его эксплуатации, как видно из таблицы, привело к некоторому сокращению периода бесперебойной работы. Так, если в 1961-62 г.г. этот период составлял 550-600 ч., то в 1963 г. он был равен всего лишь 430 часам. Таким образом, назревала острая потребность в комплексном анализе и устранении причин, уменьшающих межремонтный срок работы основных узлов ускорителя.

Для установления главных причин аварий был проанализирован обширный материал, относящийся к остановкам ускорителя в период с 1960 по 1970 г.г. Некоторая обобщенная выборка материалов, относящаяся к работе высокочастотной системы ускорителя, представлена в таблице, где, наряду с характеристиками эксплуатационных условий ускорителя, приведены также краткие сведения, касающиеся основных конструктивных изменений, выполненных на отдельных этапах.

На рис. 1 приведен схематический чертеж резонансной системы ускорителя, на котором отражены конструктивные элементы, оказывающие наибольшее влияние на работу высокочастотной системы.

В первоначальной конструкции подача воды в систему охлаждения дуанта производилась через специальные стенды (15), которые вносили дополнительную емкостную нагрузку в районе пучности тока резонансной линии. Ликвидация по предложению А.Л. Савенкова этих стендов, а также осуществление подвода охлаждающей воды через полые витки специальных индуктивностей (5), подключенных к резонансной линии в районе опорных пружин, привели к ряду существенных улучшений работы высокочастотной системы: расширился диапазон перекрытия частот за счет подъема верхней границы и, наряду с этим, произошло качественное изменение формы кривой в области захвата ионов на стабильную орбиту. Следствием этого явилось увеличение интенсивности от 0,3 до 0,8 мка.

Дальнейшее совершенствование было направлено на выбор оптимального варианта формы пакетов на статоре вариатора. Оптимизация формы пакетов привела к дополнительному увеличению интенсивности до $1,2 \text{ мка}^{1,2/}$. Естественно, рост интенсивности был достигнут при одновременном увеличении мощности, подводимой к высокочастотной системе, которая при максимальной достигнутой интенсивности, как уже отмечалось выше, достигла 50 квт.

Защита подшипников ротора вариатора от протекания через них высокочастотных токов была осуществлена путем создания надежного контакта между вращающимся ротором и статором коллекторного конденсатора. Вместо ранее существовавшего токосъемного кольца отжимного типа, которое теряло контактные свойства при некоторой выработке трущихся поверхностей, была предложена конструкция торцевого контактного кольца (рис. 2), снабженного пружинными компенсаторами для осевого перемещения кольца по мере его износа и для обеспечения надежного прилегания контактных поверхностей. В целях уменьшения износа рабочая поверхность статорного кольца цементирована. Роторное кольцо изготавливается из латуни и имеет опорный буртик высотой 2 мм, рассчитанный на полный износ в течение более 5000 часов работы ускорителя. Токосъем с колец осуществляется с помощью посеребренных упругих контактных лепестков. Кроме улучшения защиты подшипников, были приняты меры по ликвидации потерь масла из ступицы ротора вариатора. Выброс масла из ступицы, нарушая режим смазки и охлаждения подшипников, способствует интенсивному образованию разрядов в районе вариатора.

Следует заметить, что предусмотренное для этой цели лабиринтное уплотнение выполняет свои функции только при сохранении постоянной величины зазора между ротором и валом. Однако любое нарушение целостности подшипников, как правило, вызывает повреждение поверхности вала и соответственно приводит к нарушению величины зазора в лабиринтном уплотнении. Чтобы устранить эту трудность, на валу вариатора в районе лабиринтного уплотнения было установлено съемное кольцо, размеры которого выбираются сообразно выработке лабиринтного уплотнения и которое заменяется при очередном профилактическом ремонте ускорителя.

После того как проблема защиты подшипников ротора вариатора была практически полностью решена, число остановок ускорителя, связанных со сменой подшипников, сократилось до двух в год. При этом, как следует из таблицы, наиболее частые остановки теперь оказались обусловленными необходимостью замены деталей привода вариатора. Средняя частота замены деталей в системе привода вариатора при кратковременных остановках ускорителя на протяжении ряда лет составляла 6-7 раз в году, что существенно превышает число неисправностей другого рода. Привод вариатора включает в себя следующие узлы: редуктор из двух конических шестерен, карданный вал, две полуоси с муфтами, содержащими по три керамических изолятора, и муфту вакуумного уплотнения входного вала.

Как видно из таблицы, среднее число часов работы синхроциклотрона между двумя остановками в 1964 году превысило 800 и в последующем достигло 1500 часов. До установки усовершенствованной защиты подшипников замена их производилась довольно часто. При этом значительная часть времени ремонтного персонала тратилась на процедуру разборки и сборки узла привода вариатора, которая была обусловлена конструктивными недостатками исполнения вала привода ротора вариатора. Неразборная конструкция этого вала не позволяла вести разборку узла привода с одной стороны (со стороны подшипников) и требовала одновременной разборки узла редуктора. Поэтому основные усилия персонала, обслуживающего ускоритель, в последние годы были направлены на ликвидацию конструктивных и технических недостатков, связанных с исполнением отдельных звеньев устройства привода вариатора.

Новая конструкция разъемного вала (рис. 3) позволила устранить этот недостаток, благодаря чему вдвое сократилось время ремонта и существенно упростилась сама операция замены подшипников.

Одновременно с этим заметно уменьшилась радиационная нагрузка на персонал.

Среди элементов привода, наиболее подверженных авариям, долгое время оставались керамические изоляторы, смонтированные в двух муфтах, насаженных на полуоси карданного вала (рис. 4). Причина выхода из

стройка этих изоляторов была вскрыта в 1969 г. Она оказалась связанной с некоторой конструктивной недоработкой устройств крепления изоляторов.

Согласно проекту изоляторы выполняются из керамики в виде сплошных гладких цилиндров и удерживаются в крепежных обоймах за счет прессовой посадки. Однако, как выяснилось, в процессе работы вследствие расширения внешней обоймы изоляторы получают возможность проворачиваться вокруг своей оси, что приводит к постепенному наслаиванию металла на поверхность изоляторов в местах их касания с крепежными деталями. Металлизация поверхностей изоляторов обычно приводила к образованию токопроводящих участков на поверхности изоляторов, к их повышенному нагреву, растрескиванию, оплавлению поверхности и, наконец, электрическому пробое. Чтобы устранить эти явления, нужно было закрепить изоляторы иным путем. Для этого в теле изоляторов были сделаны пазы, а в обойме выступы. Такая конструкция крепления изоляторов в обоймах полностью устранила возможность прокручивания их в обоймах, что привело к ликвидации простоев по указанным выше причинам.

Помимо мер, перечисленных выше, были также применены дополнительные способы защиты изоляторов муфт карданного вала (рис. 5), а также проходных уплотнительных манжет, находящихся на полуоси, связанной со шкивом ременного привода.

Практика эксплуатации синхросиклотрона показала, что аналогичные резиновые уплотнительные манжеты, установленные в хвостовой части ротора, охлаждаемой водой, выходят из строя крайне редко, в то время как манжеты малой шестерни редуктора и манжеты шкива привода имеют весьма ограниченный срок службы. Причина недолговечности этих манжет заключается в неблагоприятных температурных условиях работы манжет. Поэтому принятые меры были направлены главным образом на защиту муфт с изоляторами и полуосей от избыточного нагрева их высокочастотными и индукционными токами, а также от попадания масла и распыленного металла. С этой целью торцовая часть изолятора защищена электростатическими экранами, с которых осуществлен токосъем. Кроме того, полуоси и шарикоподшипники заключены в магнитные экраны.

Одним из слабых мест в высокочастотной системе синхроциклотрона с точки зрения ее электрической прочности является проходной изолятор, через который подается напряжение от генератора на ВЧ систему. При возникновении разрядов в районе фидера внутренняя поверхность проходного изолятора подвергается металлизации и покрывается углеродом из-за разложения паров масла в высокочастотном электрическом поле. В результате возрастающей проводимости по внутренней поверхности проходного изолятора при наличии значительного высокочастотного напряжения последний сильно нагревается и, как правило, выходит из строя. В связи с этим в 1967 году были приняты меры, позволившие улучшить условия работы проходного изолятора. Сущность защиты проходного изолятора состоит в том, что во внутреннюю полость изолятора на расстоянии 8 мм от его поверхности вводится медный заземленный экран (см. рис. 6). В этом случае электрическое поле во внутренней полости перераспределяется и сосредотачивается в основном между фидером и экраном. Внутренняя поверхность изолятора, находящаяся под экраном, в результате этого оказывается защищенной от электрического поля, и поэтому не подвергается металлизации и воздействию масла. Благодаря такой защите проходного изолятора в этом районе резонансной системы не возникает нарушений в конфигурации электрических полей и устраняются возможные условия возникновения паразитных колебаний в системе. Из таблицы видно, что проходной изолятор за последние годы не выходил из строя.

Для уменьшения попадания паров масла из высоковакуумных насосов в ускоряющую камеру в 1968 году на входные патрубки высоковакуумных насосов были установлены защитные сетки, которые значительно уменьшили провисание высокочастотного электрического поля во внутреннюю полость насосов и заметно сократили эффективный геометрический объем камеры. Сетки изготовлены из медных шин и имеют ячейки 40 x 60 мм. Установка таких сеток повысила объемную частоту камеры и тем самым позволила уменьшить паразитные потери в ВЧ системе синхроциклотрона.

Одновременно с этим улучшились условия тренировки системы при запуске ускорителя, а токонесущие поверхности в камере стали меньше покрываться нагаром. Во внутренней полости высоковакуумных насосов нагар практически полностью отсутствует, что свидетельствует об эффективности работы электростатической защиты.

В заключение следует заметить, что представленный в отчете перечень работ и технических усовершенствований является далеко неполным и отражает лишь основные этапы, по которым шло совершенствование синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем.

Результатом проделанной работы является то, что при увеличении интенсивности внутреннего пучка протонов до уровня 2,3 мка существенно увеличился и межремонтный срок работы оборудования, который к настоящему моменту времени превышает 1500 часов.

Литература

1. В.И. Данилов и др. Возможные пути повышения эффективности шестиметрового синхроциклотрона. ОИЯИ, Б1-1515, Дубна, (1964).
2. В.И. Данилов и др. Повышение интенсивности пучка протонов в шестиметровом фазотроне ОИЯИ. Атомная энергия, №1, стр. 9 (1964).
3. И.Н. Сливков, В.Н. Михайлов, Н.И. Сидоров, А.И. Настюха. Электрический пробой и разряд в вакууме. Атомиздат, 1966.
4. А.Л. Миц, Н.Х. Невяжский, Б.И. Поляков. Некоторые особенности и основные данные высокочастотной системы шестиметрового фазотрона. Радиотехника и электроника, №7 (1956).

Рукопись поступила в издательский отдел
7 января 1972 года.

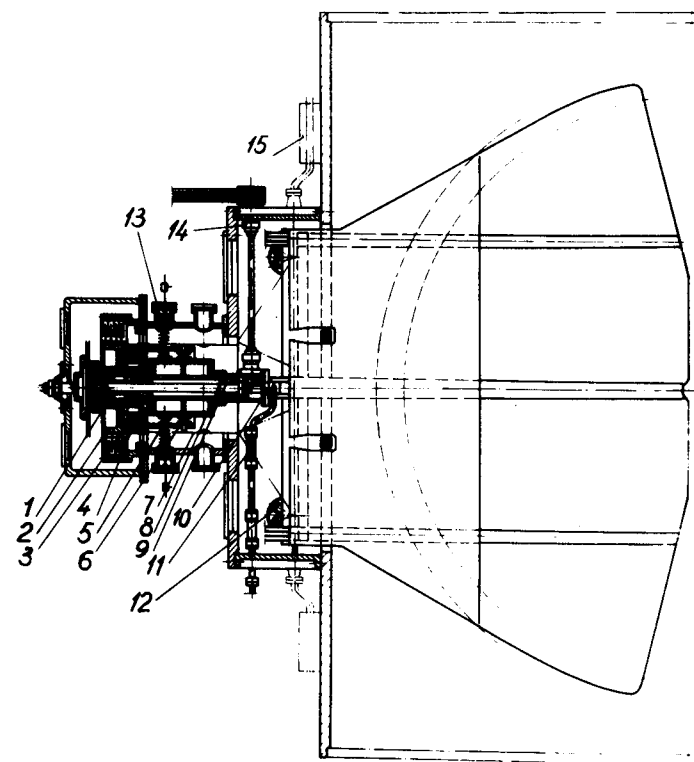


Рис. 1. Общий вид ВЧ системы ускорителя. 1 - подшипники, 2 - ротор, 3 - статор, 4 - токосъемное кольцо, 5 - пружины опорные, 6 - опорный изолятор, 7 - наружная труба резонансной линии, 8 - вал ротора, 9 - подшипники, 10 - редуктор, 11 - водопровод для охлаждения ротора, 12 - несущие опоры балок дуанта, 13 - изолятор пружин, 14 - карданный вал, 15 - стенд водоохлаждения.

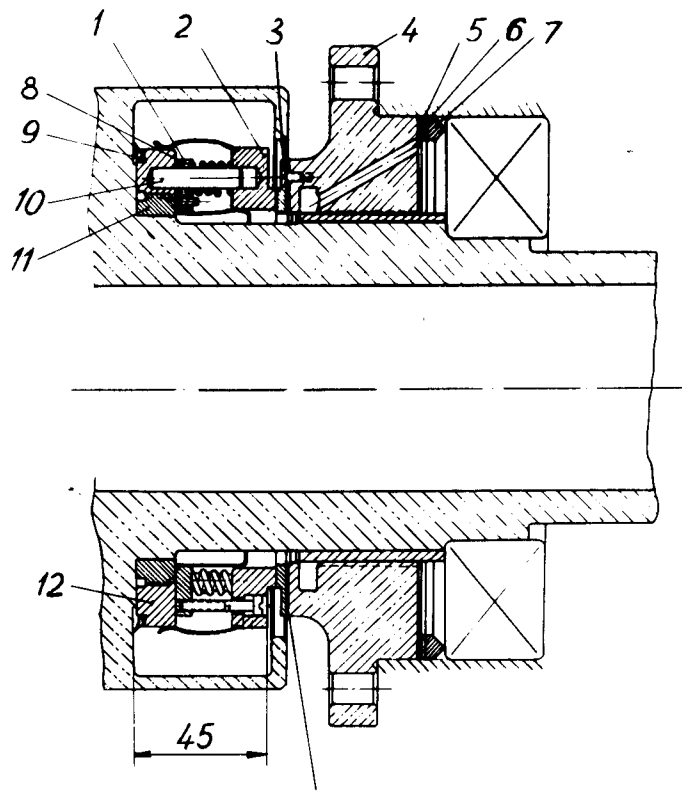


Рис. 2. Токосъемное кольцо. 1 - кольцо, 2 - кольцо, 3 - фланец, 4 - фланец, 5 - кольцо, 6 - кольцо, 7 - кольцо, 8 - пружина, 9 - кольцо, 10 - палец, 11 - кольцо, 12 - кольцо.

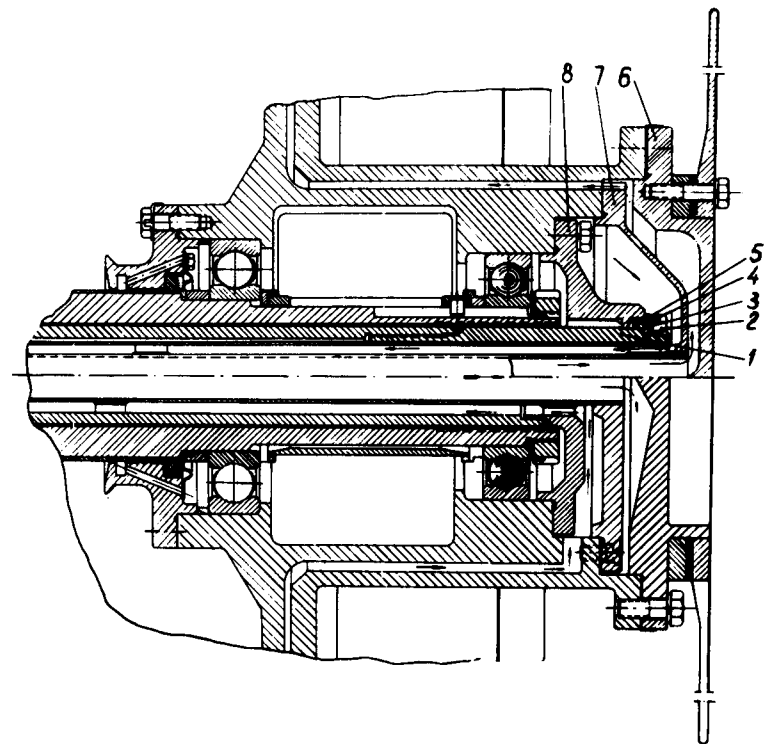


Рис. 3. Вал ротора. 1 - вал, 2 - гайка, 3 - шайба, 4 - втулка, 5 - прокладка, 6 - фланец, 7 - фланец, 8 - фланец.

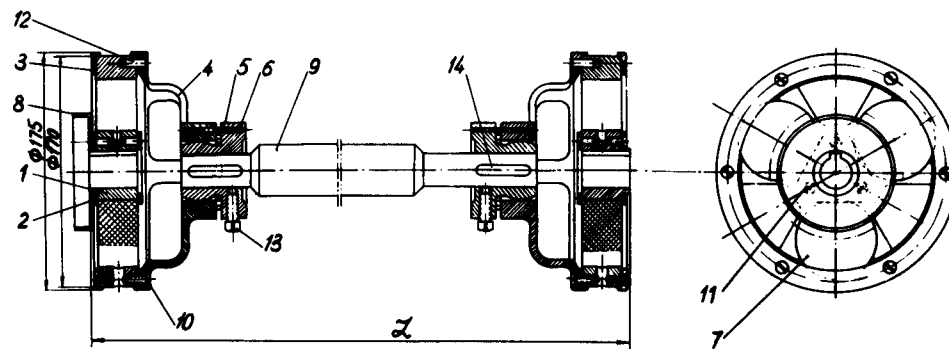


Рис. 4. Муфты карданного вала. 1 - корпус муфты, 2 - шайба пружинная, 3 - кольцо пружинное, 4 - полумуфта, 5 - втулка шаровая, 6 - стержень, 7 - изолятор, 8 - втулка, 9 - вал, 10 - винт, 11 - штифт, 12 - винт установочный, 13 - шпонка.

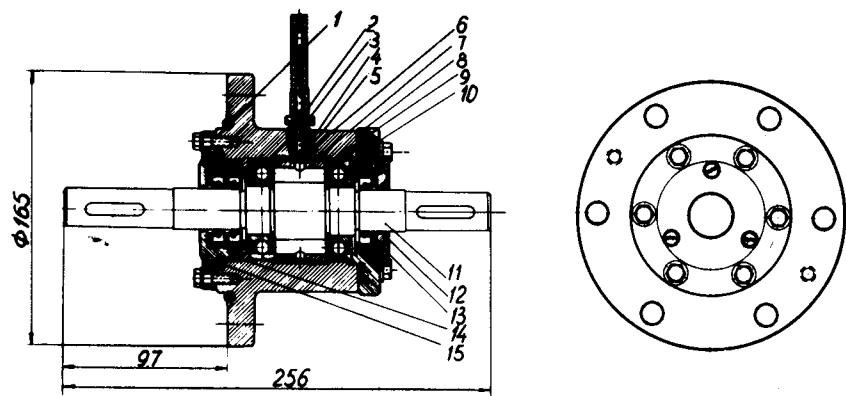


Рис. 5. Муфта. 1 - прокладка, 2 - трубка, 3 - гайка, 4 - шайба, 5 - прокладка, 6 - корпус, 7 - втулки, 8 - фланец, 9 - подшипник, 10 - прокладка, 11 - вал, 12 - крышка, 13 - манжета уплотнительная, 14 - прокладка.

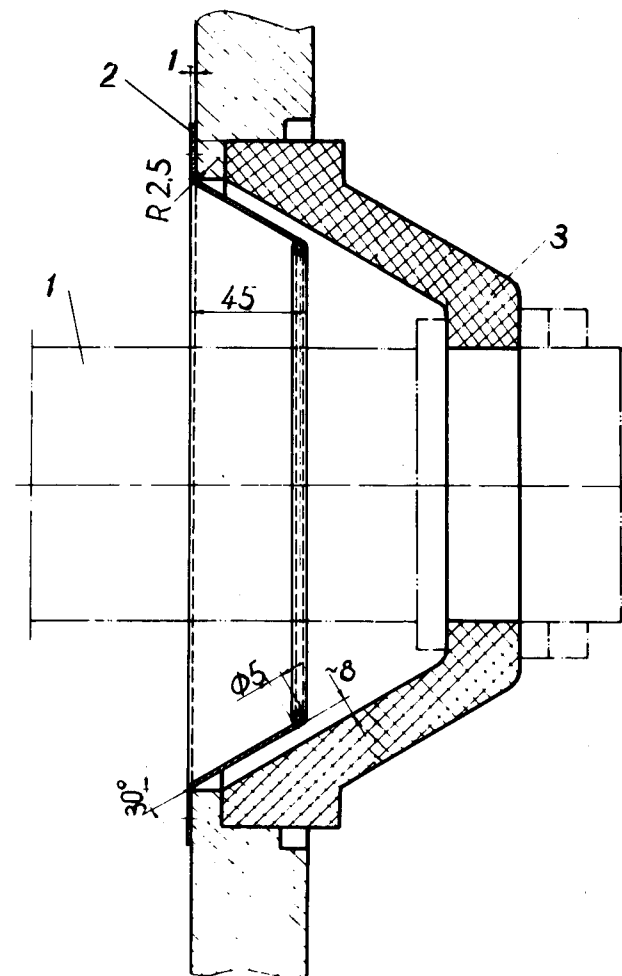


Рис. 6. Проходной изолятор. 1 - фидер, 2 - экран, 3 - изолятор.

§ Таблица
режимов работы ускорителя и ремонтов в. ч. системы за 1960 - 1970 годы.

| Режимы и ремонт в. ч. системы | 1960 | 1961 | 1962 | 1963 | 1964 | 1965 | 1966 | 1967 | 1968 | 1969 | 1970 |
|--|------|---|--------------------------------------|---|--|-------------------------------------|--|---|--|--------------------------------------|------------------------------------|
| Мощность генератора (квт) | 32 | 40 | 40 | 48 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Число оборотов/мин. генератора | 520 | 560 | 650 | 680 | 680 | 680 | 690 | 690 | 690 | 690 | 690 |
| Ток пучка (ма) | 0,3 | 0,8 | 1,1-1,2 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 |
| Работа ускорителя (час) | 4113 | 5194 | 5550 | 4756 | 5718 | 5680 | 5728 | 5270 | 5577 | 6194 | 4555 |
| Устранение короткого замыкания | 2 | | | 1 | | | | | | | |
| Замена одной лампы | 2 | | | | 1 | | | 1 | | | |
| Ремонт прибора генератора | 4 | 1 | 4 | 2 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 1 |
| Замена подшипников ротора | 6 | 7 | 5 | 6 | 3 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| Замена прокладочного изолятора | | 1 | | 2 | | | 2 | | | | |
| Резьбы ускорителя | 2 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| Число ламп деталей прибора генератора | 7 | 8 | 9 | 8 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 4 | 3 |
| Среднее время работ ускорителя между осмотрами | 375 | 575 | 615 | 430 | 815 | 950 | 820 | 880 | 930 | 1250 | 1500 |
| Конструктивные изменения | | Снятие дельта-траншейных частей. Переход на работу в вакууме. | Установка новых стандартных катушек. | Установка трансформатора за установку в центре. | Установка на вей катушки магнетрона. Замена редуктора. | Установка катушек магнетрона пучка. | Увеличение aperture ч.о. дельта, переход на лампы 19-3М. | Установка экранов на прокладочный изолятор. | Установка нового ротора и защитных сеток на вольные лампы 19-3М и М-4-1. | Изменение крепления изоляторов муфт. | Установка нового магнетрона лампы. |