



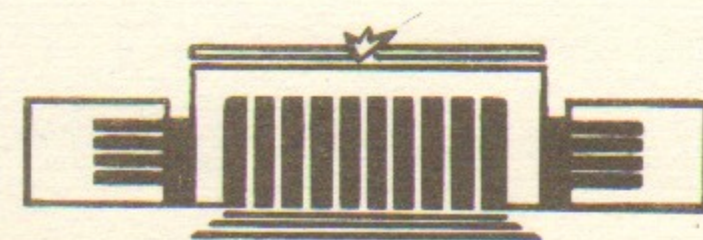
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

19

Л.Л.Данилов, Г.И.Сильвестров, А.Д.Чернякин,
В.В.Кореневский, Е.Б.Сугак

**ПРИМЕНЕНИЕ ЦЕМЕНТНОЙ ИЗОЛЯЦИИ
ДЛЯ СОЗДАНИЯ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ
ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТОВ**

ПРЕПРИНТ 84-127



НОВОСИБИРСК

ПРИМЕНЕНИЕ ЦЕМЕНТНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ
РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТОВ

Л.Л.Данилов, Г.И.Сильвестров, А.Д.Чернякин

Институт ядерной физики, Новосибирск

В.В.Корневский, Е.Б.Сугак

Московский Инженерно-строительный институт
им.В.В.Куйбышева, Москва

А Н Н О Т А Ц И Я

В работе приводятся результаты исследований в возможности применения цементного вяжущего в качестве силовой высоковольтной изоляции в радиационно-стойких импульсных магнитах. Проведено исследование и выбор типов цементов по их электрическим, механическим и технологическим свойствам. Обосновывается выбор конструктивной схемы одновитковых магнитов с потенциальным магнитопроводом и объемным обжатием цементной изоляции. Приводятся результаты испытаний такой изоляции в условиях импульсных нагрузок на миллионы циклов на силовой модели магнита с подъемом поля до 10 Тесла. Описывается принятая в результате этих исследований конструкция магнитов, технология их изготовления и результаты испытаний модели рабочего варианта магнита.

Проводимые в ИИФ разработки элементов мишенных станций, предназначенных для работы с интенсивными протонными пучками $\sim 10^{13}$ частиц в секунду, в частности, импульсных фокусирующих систем /1/ и магнитов для генерации /2/ и развертки пучков /3/, потребовали специального выбора радиационноустойчивых изоляционных материалов, применяемых при создании высоковольтной импульсной аппаратуры, способных сохранять свои электрические и механические параметры в условиях набора дозы до сотен тысяч мегарад в год. Такие радиационные нагрузки на 2-3 порядка превышают допустимые дозы для традиционно применяемых в электротехнике изоляционных материалов на основе эпоксидных компаундов /4/, очень удобных по своим технологическим свойствам для склейки, заливки и пропитки различных изделий. Широко применяемые нами при разработках радиационноустойчивых высоковольтных конструкций керамика и электротехническая слюда, а также описанные в работе /2/ многослойные изоляторы на основе фольг из алюминия, титана, тантала с изоляционными покрытиями, осуществляемыми методом микродугового оксидирования, обладая хорошими радиационными свойствами, не всегда применимы для изоляции больших поверхностей и геометрически сложных зазоров.

Перспективным материалом для этих целей являются неорганические вяжущие вещества, в частности, композиции на основе некоторых видов минеральных цементов. При хорошей радиационной стойкости и электромеханических характеристиках, из цементных композиций благодаря их малой усадке при затвердевании возможно изготовление сложных по конфигурации объемов, омоноличивание тонких зазоров и трудно доступных мест. Указанные свойства позволили, например, применять цементную изоляцию в разработках радиационноустойчивых постоянных магнитов для заливки межвитковых зазоров многовитковых обмоток /5/.

Целью настоящей работы явилось исследование возможности использования цементного вяжущего для создания изоляции в импульсных дипольных магнитах с большими индукциями от 2 тесла и выше, спецификой которых, в отличие от постоянных магнитов с низким межвитковым напряжением и статическим механическим нагружением изоляции является существенно более высокое электрическое напряжение на изоляционных зазорах (порядка 1 кВ и выше), динамический режим нагружения изоляции и необходимый ресурс в десятки миллионов циклов.

Исследования, выполненные на кафедре Строительства ядерных установок МИСИ им. В. В. Куйбышева /6/ позволили выбрать для этой цели цементную композицию на белитоалюминатном цементе (цемент БАЦ) и тонкоизмельченным кварцем. Белитоалюминатный цемент изготавливается из отходов производства и имеет невысокие строительные свойства, однако благодаря тому, что затвердевшее вяжущее состоит, в основном, из гелевидных соединений гидросиликатов кальция типа $CaSiH(B)$ и Ca_2SiH_2 и в нем отсутствуют кристаллы гидроксида кальция $Ca(OH)_2$, оно обладает более высокими диэлектрическими свойствами. К тому же цемент БАЦ в отличие от высокоглиноземистого цемента, рекомендуемого ЦЕРН для радиационностойких магнитов /5/, не имеет усадки при твердении, обеспечивая тем самым более плотный и надежный контакт с поверхностями заливаемых зазоров. Последнее обстоятельство особенно важно для магнитов, работающих в импульсном режиме, так как при наличии даже незначительной полости после нескольких миллионов импульсов "сжатие-растяжение" эта неплотность приводит к растрескиванию изоляции и, в конечном счете, к разрушению. Что касается радиационной стойкости белитоалюминатного цемента, то она будет не ниже достаточно хорошо изученной радиационной стойкости портландцемента, к классу которого относится цемент БАЦ.

Для выбора оптимальных составов с высокими диэлектрическими и физико-механическими свойствами были исследованы двадцать пять композиций на цементе БАЦ и высокоглиноземистом цементе Талком. Свойства наиболее перспективных композиций, определенные при нормальных условиях и без тепловой обработки после твердения смеси представлены в таблице I. Из экспериментальных результатов следует, что диэлектрические свойства, определенные при нормальных условиях у композиций на цементе БАЦ значительно выше, чем у композиций на цементе Талком. Содержание кварца в приготовляемом растворе составляло 50% от массы цемента, тонкость его помола равнялась тонкости помола цемента. Сухие компоненты — цемент и кварц перемешивались, затем смесь затворялась водой в количестве 35%—40% от массы смеси и тщательно перемешивалась. Необходимой технологической операцией при изготовлении изделий со сложными изоляционными зазорами является их вибрация в процессе заполнения цементным раствором или его инектирование под давлением. Магнит помещается на вибрационный стол и при его работе осуществляется заполнение зазоров цементным тестом через

технологические отверстия. Испытания изделий начинались после затвердевания цементного раствора и набора им достаточной прочности в течение 2+4 месяцев.

Таблица I

Содержание кварца, % от массы цемента и кварца	Количество воды затворения, % от массы цемента и кварца	Электрическая прочность кВ/см	Объемное сопротивление при 10 В 10 Ом.см	Прочность на сжатие МПа	Прочность на растяжение МПа	Динамический модуль упругости МПа
--	---	-------------------------------	--	-------------------------	-----------------------------	-----------------------------------

Цемент белитоалюминатный БАЦ

30	30	28,0	1,67	35,1	-	-
50	30	32,1	2,61	41,8	6,3	$0,9 \cdot 10^4$
70	30	38,0	2,62	24,8	-	-

Цемент высокоглиноземистый Талком

30	32,5	16,7	1,38	67,6	-	-
50	32,5	17,8	1,07	76,2	-	-
70	32,5	18,5	1,23	72,6	-	-

Основным вопросом при разработке импульсных магнитов с большими индукциями является выбор конструктивной схемы, обеспечивающей его механическую прочность и оптимальные условия работы изоляции. Такие требования наилучшим образом выполняются в одновитковых конструкциях со скиновым формированием поля и шихтованным магнитопроводом, которые запитываются импульсами тока с длительностью в несколько миллисекунд. При расстоянии между параллельными шинами, приблизительно равном половине зазора между шихтованными полюсами, однородность поля в таком магните в центральной области с диаметром, равным расстоянию между шинами, ухудшая лишь до 1+1,5% в процессе насыщения железа вплоть до индукций 5+7 тесла /7/.

Выбранный нами вариант магнита является дальнейшим развитием конструктивной схемы с потенциальным магнитопроводом /2,7/, в котором токовые шины жестко крепятся непосредственно на железе магнитопровода, оказывающим ся под потенциалом шин и изоли-

руемом от силового банджа по наружному контуру изоляционным зазором, заполняемым цементным раствором (позиция I на рис.1). При этом усилие расталкивания шин магнитным полем передается через магнитопровод на большую площадь изоляции, обеспечивая на ней минимальное удельное давление. Изоляция между двумя половинами магнитопровода в области апертуры осуществляется посредством тонкого зазора в $0,5 + I$ мм, в который свободно вставлены пластины электротехнической слюды или оксидированные фольги, не испытывающие никаких механических нагрузок. С удалением от апертуры этот зазор увеличивается и переходит в широкую область, заполненную цементным раствором (2 на рис.1) и воспринимающую давление сжатия силового банджа. Условием правильной работы такой конструкции является обжатие ее банджом с силой, превышающей усилие расталкивания шин, что обеспечивает отсутствие усилий растяжения на цементную изоляцию в области (2). Наружный контур магнитопровода выполнен круглым, так что кольцевой бандж создает объемное статическое обжатие цементной изоляции во всех ее сечениях. В динамическом режиме нагружения статические и динамические напряжения в области (1) складываются, а в области (2) вычитаются, разгружая изоляцию, но не доводя до нуля напряжение ее предварительного сжатия, что обеспечивает отсутствие нежелательных для материала изоляции знакопеременных нагрузок в конструкции рис.1 или нераскрытие стыка в конструкции рис.2. Исследование напряженного состояния изоляционного слоя в выбранной геометрии проводилось на плоской модели магнита из прозрачных полимерных материалов методом фотоупругости на поляризационной установке БЩ-ИМАШ 120 /8/.

Для исследования поведения цементной изоляции в режимах динамического нагружения была изготовлена силовая модель магнита длиной 270 мм с высотой шин 40 мм и малым расстоянием между ними для уменьшения энергоемкости системы (рис.1), в которой эмитировалась реальная топография распределения напряжений в изоляции от расталкивания шин и статического обжатия. Изоляционный зазор толщиной 15 мм образовывался между магнитопроводом и тонкостенной трубой с двумя продольными разрезами в вертикальной плоскости симметрии, которая обжималась банджом, выполненным в виде двух полуколец, стягиваемых шпильками с усилием ~ 2 тн/см длины магнита. Одновременно на этой модели отработывалась технология заполнения зазора цементным тестом на

стандартом вибрационном столе. На торцах зазор закрывался асбоцементными кольцами и заливка производилась при вертикальном расположении магнита на вибрационном столе через отверстия в области (2). Испытания были начаты через 4 месяца после заливки при поле между шинами 2,5 Т и после каждого миллиона циклов поле повышалось до 3,75 Т, 4,25 Т и 5 Т. После 3 миллионов циклов при поле 5 Т бандж был снят и наружная труба разрезана на две части в продольном направлении. При этом труба оказалась в хорошем сцеплении с цементом и после ее снятия на поверхности цемента не обнаружилось каких-либо заметных растрескиваний и разрушений. После повторной сборки испытания продолжались с подъемом поля до 7,5 Т (3 тысячи циклов) и до 10 Т (1 тысяча циклов), после чего они были прекращены из-за разрушения токоподводов при токе более 400 кА.

Проведенные испытания показали хорошие механические свойства цементной изоляции при динамических режимах нагружения и подтвердили правильность выбранной конструктивной схемы. На ее основе были разработаны конструкции двух типов магнитов с С-образным и 0-образным магнитопроводами и изготовлена модель первого из них с апертурой 5×5 см² (рис.2а). В отличие от силовой модели, наружный кожух этого магнита (1), служит одновременно силовым банджом, обеспечивающим объемное обжатие цементного изоляционного слоя (2). Внутренняя шина (3) крепится на магнитопроводе (4) посредством продольных шпонок (5); наружная шина (6) находится под земляным потенциалом. Она опирается на базовые поверхности (13), образованные асбоцементными пластинами (7), ограничивающими изоляционный зазор, заполненный цементным раствором, и прижимается к ним стальной пластиной (8), к которой притягивается бандж. В тонкий зазор (9) между шиной и магнитопроводом свободно вставляются изоляционные пластины из электротехнической слюды или оксидированных фольг. На рис.2б показан магнит с технологической плитой (10) и вкладышем (11), на которых осуществляется сборка шихтованного магнитопровода, формовка базовых поверхностей (13) и тонкого изоляционного зазора (9) и заливка магнита. После сборки магнитопровода, пластины которого опираются на базовые поверхности (12) технологической плиты, на заниженную часть других ее базовых поверхностей (13) свободно укладываются куски асбоцемента или любого твердого диэлектрика (например, пластины мрамора или куски гранита), у которых обра-

ботана только нижняя поверхность, опирающаяся на базовую плоскость плиты. После надевания банджа, опирающегося на поверхности (14) технологической плиты, осуществляется заполнение зазора цементным тестом при горизонтальном положении магнита на вибрационном столе через отверстия (15). После набора прочности цементным раствором технологическая плита снимается и производится монтаж наружной шины (6).

При квадратной апертуре магнит рассчитан на работу при индукциях до 2Т, ограниченных насыщением железа и искажением топографии поля. С изменением геометрии шины (пунктир на рис.2а) для получения апертуры 25x50 мм с увеличенным вертикальным зазором, магнит может использоваться для работы при индукциях до 5+7Т. Силовые испытания модели магнита длиной 270 мм производились с шиной, создающей апертуру 5x50 мм², для уменьшения энергоемкости и упрощения системы питания. При индукции 5Т и длительности импульса 1 мс к настоящему времени произведено миллион циклов и ресурсные испытания продолжаются.

Второй вариант магнита с 0-образным магнитопроводом (рис.3а,б) имеет точно такую же конструкцию, но состоит из двух половин, симметричных относительно вертикальной плоскости, в которой располагается тонкий изоляционный зазор между двумя частями магнитопровода. Каждая половина магнита изготавливается независимо по описанной выше технологии, после чего они собираются на технологическом вкладыше и штампуются.

Приведенная на рис.3 конструкция магнита имеет апертуру 160x180 мм² и длину 1,5 м. Магнит предназначен для сепарации вторичных частиц в нейтринной мишенной станции ИФВЭ при организации моно-нейтринных экспериментов с бустерной интенсивностью. Он рассчитан на работу при индукциях 1,5+2Т в зависимости от требований на однородность поля в апертуре.

В заключение заметим, что применение подобных конструкций импульсных магнитов с цементной изоляцией может оказаться также выгодным и в обычных системах транспортировки пучков, где нет специальных требований на радиационную стойкость, благодаря более простой и дешевой технологии заливки цементного раствора по сравнению с эпоксидными компаундами, требующими специального оборудования и сложной технологии заливки под давлением.

Л и т е р а т у р а

1. B.F. Bayanov et al. *NIM*, 190(1981), 9-14
2. В.Н.Карасюк, Г.И.Сильвестров. "Разработка импульсных радиационностойких магнитов с полем 5Т". Труды УП Всесоюзного Совещания по ускорителям. Дубна, 1980 г., т.1, стр.121.
3. Т.А.Всеволожская и др. "Разработка протонного пучка для устранения эфетов теплового разрушения мишеней при работе с пучками высокой плотности". Труды УШ Всесоюзного Совещания по ускорителям. Протвино, 1982 г., т.1, стр.317.
4. В.Е.Бородин, В.Н.Лебедев и др. "Радиационные нагрузки и радиационная стойкость конструкционных материалов на протонном синхротроне ИФВЭ". Препринт ИФВЭ ЛРН, 76-140, Серпухов, 1976 г.
5. R.L. Keizer, M. Motier. *Radiation resistant magnets CERN 82-05 Super Proton Synchrotron. Geneva 1982*
6. В.В.Афанасьев и др. "Радиационностойкая электроизоляция на основе цементных вяжущих" Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям. Дубна, 1984 г. В печати.
7. В.В.Вечеславов и др. "Формирование поля в импульсном одновитковом магните с насыщающимся железом". Труды У1 Всесоюзного Совещания по ускорителям, Дубна, 1978 г., т.1, стр.181.
8. В.В.Кореневский и др. "Напряженное состояние цементной электроизоляции импульсного магнита". Труды IX Всесоюзного Совещания по ускорителям. Дубна, 1984 г., В печати.

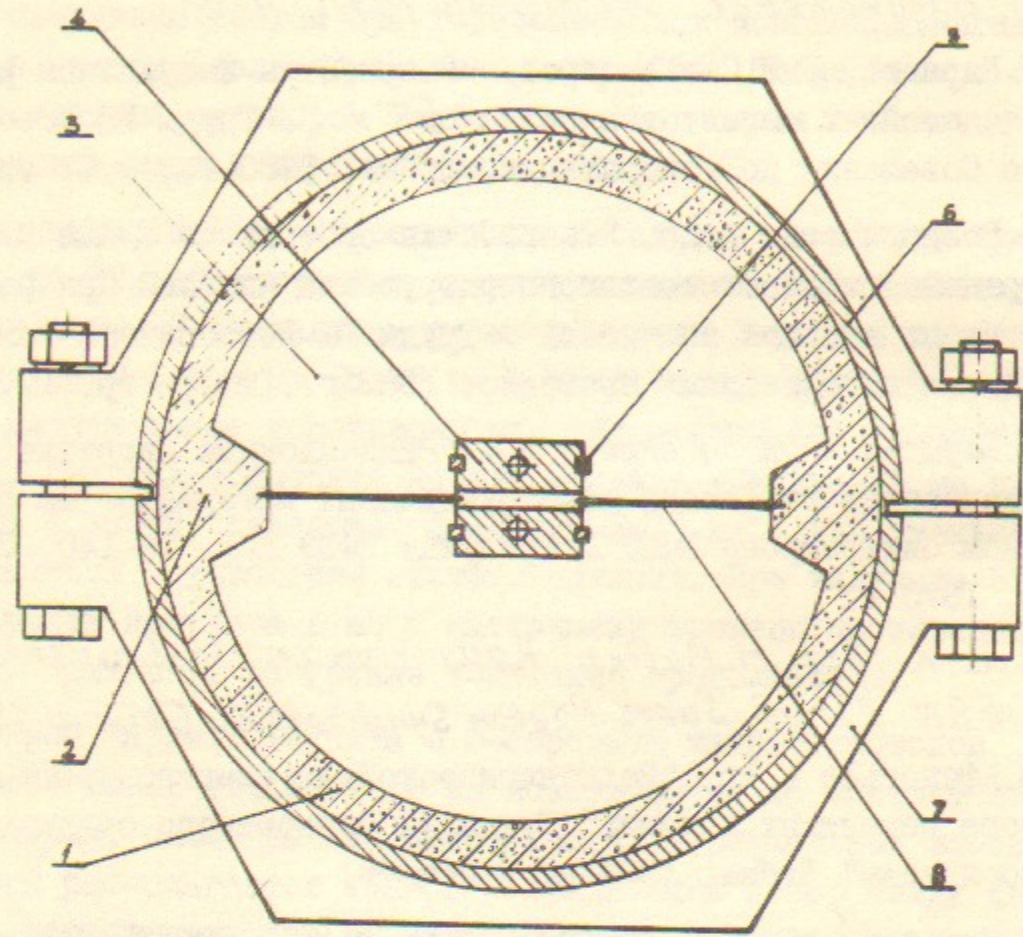


Рис.1. Поперечное сечение силовой модели.

1 - цементная изоляция, 2 - часть цементной изоляции, разгружаемая под действием импульсной силы, 3 - шихтованный магнитопровод, 4 - токовые шины, 5 - шпонки, 6 - кожух, 7 - силовой бандаж, 8 - изоляционный зазор.

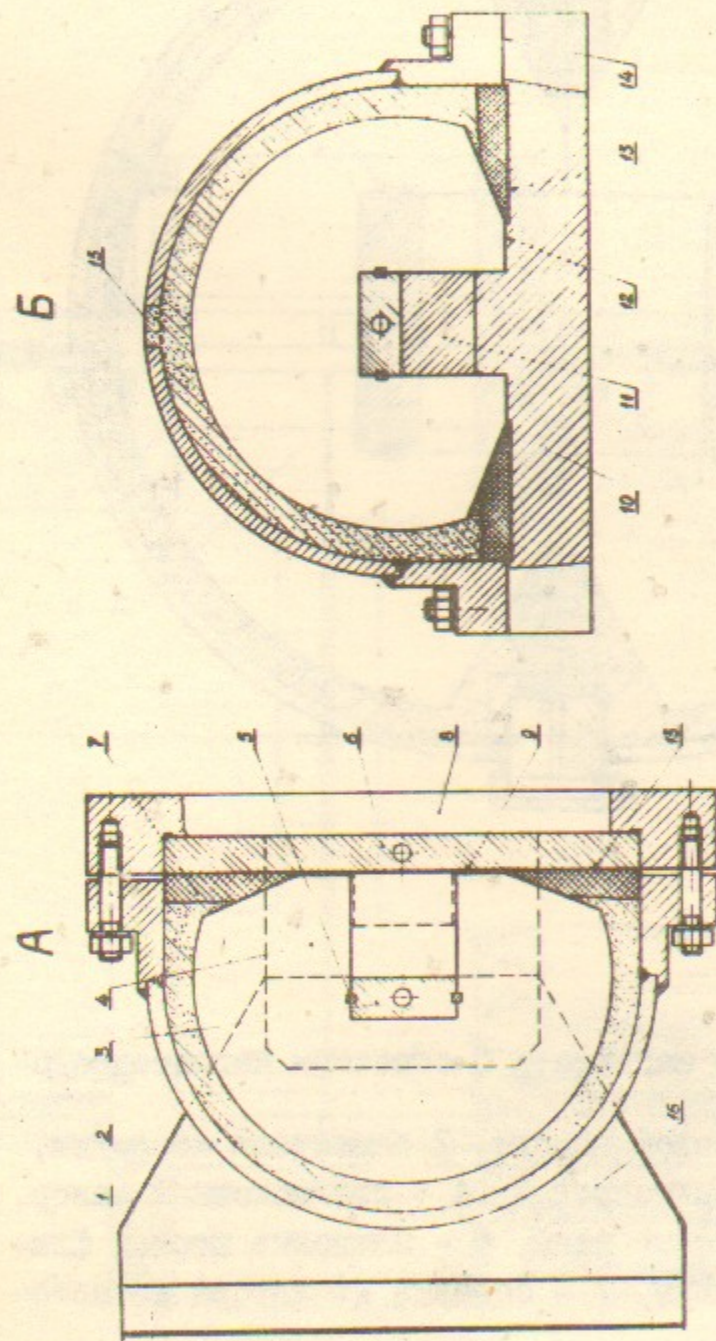


Рис.2. А - сечение магнита с С-образным магнитопроводом.

1 - Силовой корпус, 2 - цементная изоляция, 3 - внутренняя токовая шина, 4 - магнитопровод, 5 - шпонки, 6 - наружная токовая шина, 7 - базовые абсорбционные цементные вкладыши, 8 - прижимная плита, 9 - изоляционный зазор, 10 - токовод, 11 - магнит с технологической оснасткой для заливки, 12 - базовая технологическая плита, 13 - технологический вкладыш фиксации магнитопровода, 14 - базовая поверхность магнитопровода, 15 - базовая поверхность изолятора, 16 - базовая поверхность корпуса.

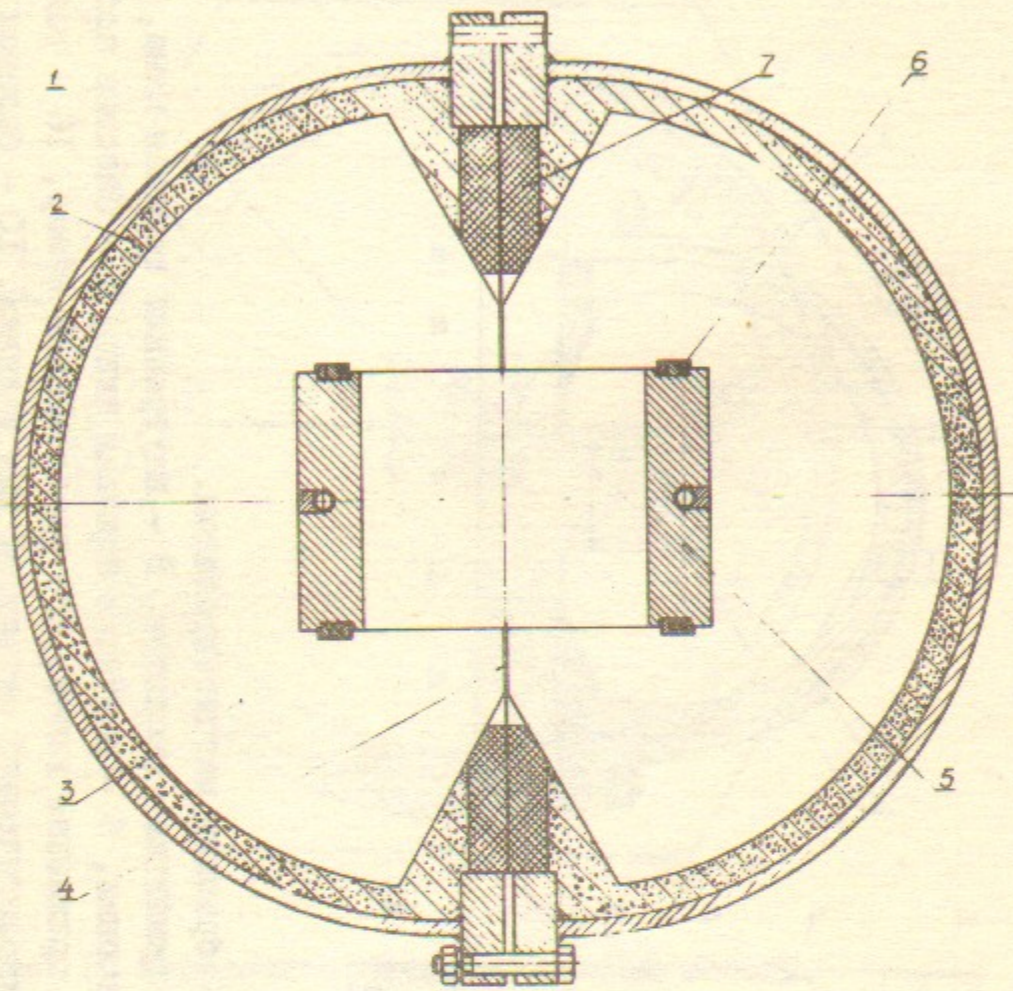


Рис. 3А. Сечение магнита с 0-образным магнитопроводом.
 1 - Силовой корпус, 2 цементная изоляция,
 3 - магнитопровод, 4 - изоляционный зазор,
 5 - токовые шины, 6 - клиновидные шпонки фиксации шины, 7 - базовые изоляторы из асбестоцемента.

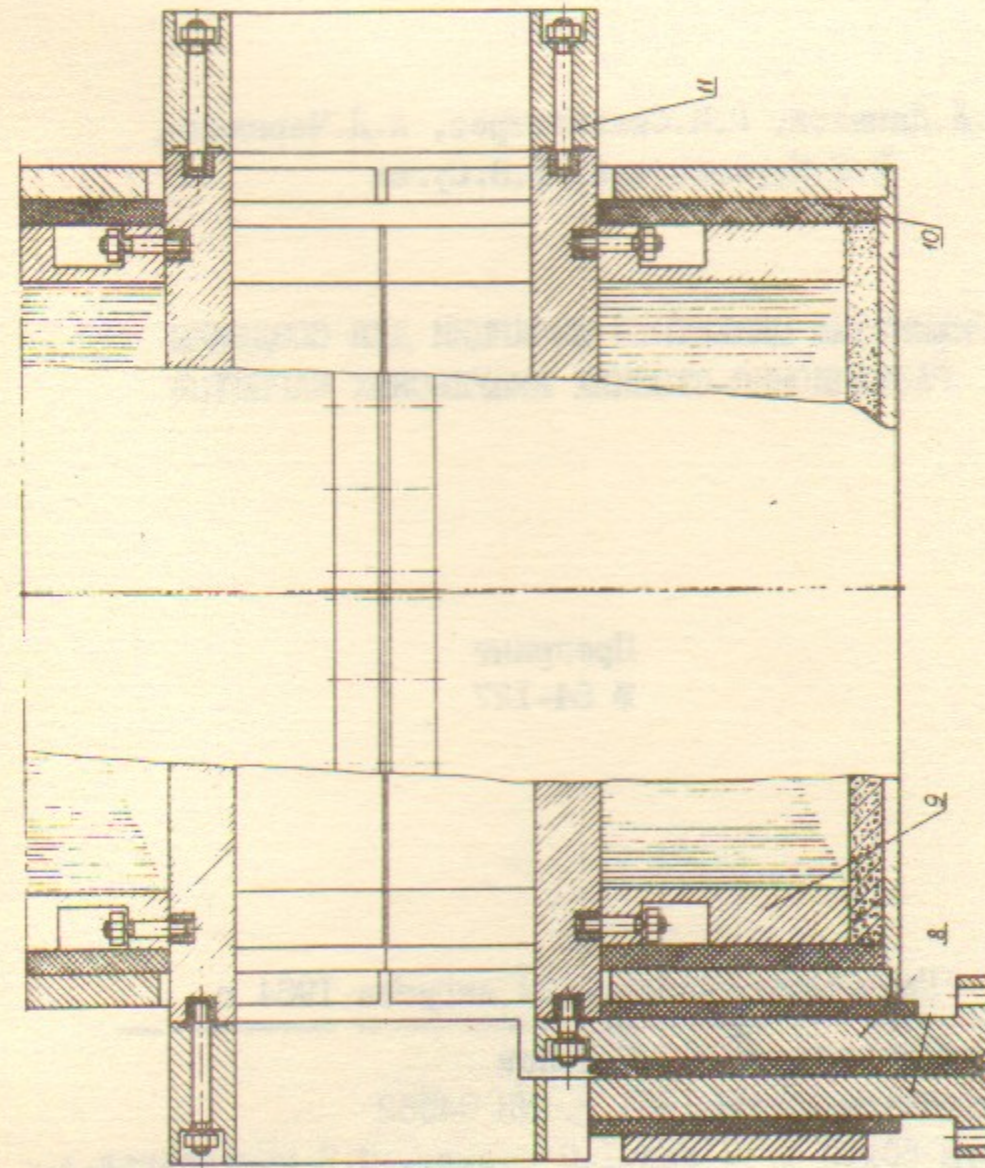


Рис. 3Б. Продольный разрез магнита с 0-образным магнитопроводом.
 8 - плоские токоподводы, 9 - торцевые шпильки фиксации магнитопровода,
 10 - торцевые изоляторы из асбестоцемента, II - торцевая коммутационная шина.

Л.Л.Данилов, Г.И.Сильвестров, А.Д.Чернякин,
В.В.Кореневский, Е.В.Сугак

ПРИМЕНЕНИЕ ЦЕМЕНТНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ
РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТОВ

Препринт
№ 84-127

Работа поступила - 24 августа 1984 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов
Подписано к печати 26.09-1984 г. МН 04562
Формат бумаги 60х90 1/16 Усл.л., 0 печ.л., 0,9 учетно-изд.л.
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 127.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90