

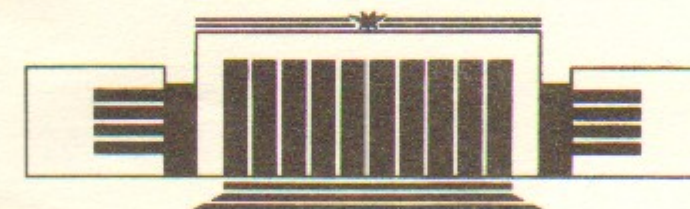


ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

Ю.Д. Валяев, И.В. Казарезов, А.М. Крючков

**СЕКЦИОНИРОВАННЫЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ
МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИЕ ИЗОЛЯТОРЫ
ДЛЯ УСКОРИТЕЛЬНЫХ ТРУБОК**

ПРЕПРИНТ 88-143



НОВОСИБИРСК

Ю.Д. Баранов, Н.В. Казарезов, А.М. Крючков

СЕКЦИОНИРОВАННЫЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ
МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИЕ ИЗОЛЯТОРЫ
ДЛЯ УСКОРЯТЕЛЬНЫХ ТРУБОК

ТРИПТИХ 68-143

УДК 621.372.6.01

© Институт ядерной физики СО АН СССР

В статье описаны конструкция и технология изготовления секционированных высоковольтных металлокерамических изоляторов для ускорительных трубок. Приведены результаты экспериментальных исследований, проведенных на макете линейного ускорителя ВЛЭПП. Показано, что использование металлокерамических изоляторов позволяет повысить надежность и долговечность ускорительных трубок.

Параметры и работоспособность ускорителей прямого действия, как импульсных, так и непрерывных, во многом определяются конструкцией и технологией изготовления ускорительной трубки (УТ), являющейся одним из важнейших узлов ускорителя.

В последнее время при разработке УТ отдается предпочтение конструкциям без органических материалов [1, 2, 3], так как присутствие углеводородов снижает рабочие градиенты вакуумной изоляции и может способствовать снижению эмиссионной способности катодов.

Проведенная в ИЯФ СО АН СССР разработка УТ на базе металлокерамических изоляторов из керамики 22ХС, изготавливаемых методом термокомпрессионной сварки, нашла применение в импульсных ускорителях прямого действия (ускоритель ЭЛИТ-0,8 [4], ускоритель ЭЛИТ-3 для позитронного источника ВЭПП, инжектор электронов для исследования предельного темпа ускорения на макете линейного ускорителя ВЛЭПП [5] и др.).

Длительная эксплуатация УТ, выполненных в соответствии с [2], выявила, однако, некоторые недостатки и ограничения, присущие такой конструкции:

1. Малая апертура не позволяет использовать ее на повышенные токи пучка.

2. Развитая волнистая поверхность со стороны вакуума, наряду с повышением электрической прочности вдоль поверхности изолятора, вызывает дополнительное, по сравнению с гладкой поверхностью, накапливание заряда во впадинах, что при высоком сопротивлении утечки вызывает в отдельных случаях пробои по телу

ребер со скалыванием их; из-за различия в распределении напряжения вдоль наружной и внутренней поверхности изолятора возможен пробой по телу изолятора с нарушением вакуумной плотности.

К тому же механическая обработка развитой поверхности изолятора вызывает появление микротрещин, прижогов и т. д. [6], уменьшающих эффективное поперечное сечение кольца. Провести термообработку керамики после механической обработки не представляется возможным из-за отсутствия оборудования.

При последующей термокомпрессионной сварке в месте контакта металла с керамикой прикладываются давления, близкие к пределу механической прочности керамики; по этой причине в районе впадин механические напряжения по сечению кольца могут достигать значений, близких к разрушающим.

3. Эксплуатация УТ, особенно в импульсных ускорителях электронов с генератором высокого напряжения на основе трансформатора Тесла, выявила необходимость тщательной экранировки поверхности керамики от попадания электронов с энергией несколько кэВ и выше.

Как показали исследования [7], бомбардировка поверхности изолятора электронными пучками может привести к сквозному пробое диэлектрика с нарушением герметичности прибора. Согласно [7], сквозной пробой происходит из-за накопления объемного заряда от высокоэнергетичных электронов, внедряющихся в стенку диэлектрика. Локальное усиление поля на конце канала вызывает разряды, приводящие к появлению сети мелких каналов, а в конце концов — к сквозному пробое. Такому пробое способствует недостаточная спеченность керамики, если она имеет место.

Анализ пробитых по толщине колец в первых конструкциях УТ с использованием методов микроструктурного анализа показал, что керамика недостаточно спечена и имеет поры. В процессе эксплуатации недостаточно спеченной керамики многократно прикладываемое давление снаружи в сочетании с бомбардировкой поверхности высокоэнергетичными электронами может разрушить перемычки у пор и в большей мере способствовать сквозному пробое оболочки изолятора.

В связи с этим была изучена возможность проверки качества спекания керамики по светопропусканию [8]; в результате исследований была освоена методика позволяющая осуществлять 100%-ный контроль керамики неразрушающими методами — без микроструктурного анализа.

При разработке новых металлокерамических узлов ставились следующие технические требования:

1. Диаметр изолятора должен обеспечивать возможность пропускания без осаждения на его поверхность импульсных токов до 50 А.

2. УТ должна выдерживать многократные термоциклы до температур 400—500°C.

3. Механическая жесткость УТ должна быть достаточной для обеспечения работоспособности ее как при вертикальном, так и горизонтальном расположении оси УТ длиной до 1 м и нагрузкой на высоковольтном электроде до 20 кг.

В качестве базового варианта был выбран изолятор диаметром 120/135 мм (технологические пробы термокомпрессионных сварок металлокерамических узлов до диаметров 180 мм дали положительные результаты)

Высота изолятора (17 мм) обусловлена тем, что ее дальнейшее увеличение вызывает снижение $E_{пр}$ [9], а количество секций в узле (7 шт.) — длиной рабочей зоны печи с малым температурным разбросом.

Было проработано два варианта металлокерамических узлов, в конструктивном отношении несущественно отличающихся между собой. Коротко охарактеризуем каждый из них.

Первый вариант по исполнению близок к изложенному в [2] (рис. 1). Электроды внутри колбы выполнены составными — медные манжеты 3, 4 (медь МБ толщиной 0,8—1 мм), предварительно армированные с помощью диффузионной сварки коваровыми накладками 5 (Ia, IIa, б), позволяющими сохранить посадочные места под фокусирующие электроды и угол экранировки диэлектрика металлом в месте стыка металл — диэлектрик — вакуум $\sim 30^\circ$ неизменным после температурных воздействий свыше 1000°C в процессе сварки.

Крепление фокусирующих электродов УТ осуществляется байонетным способом в кольцевых проточках с тремя пазами, профрезерованными под углом 120°. Разработчиками установки ПРИЗ [10] используется другой способ крепления — запрессовка предварительно охлажденных в жидком азоте фокусирующих электродов в дополнительно проточенные после сварки узла электроды колбы.

Крайние манжеты 3, тарельчатый профиль которых служит для обеспечения тепловой развязки керамики при сварке узлов между собой или с торцевыми фланцами, выполнялись в двух модификациях.

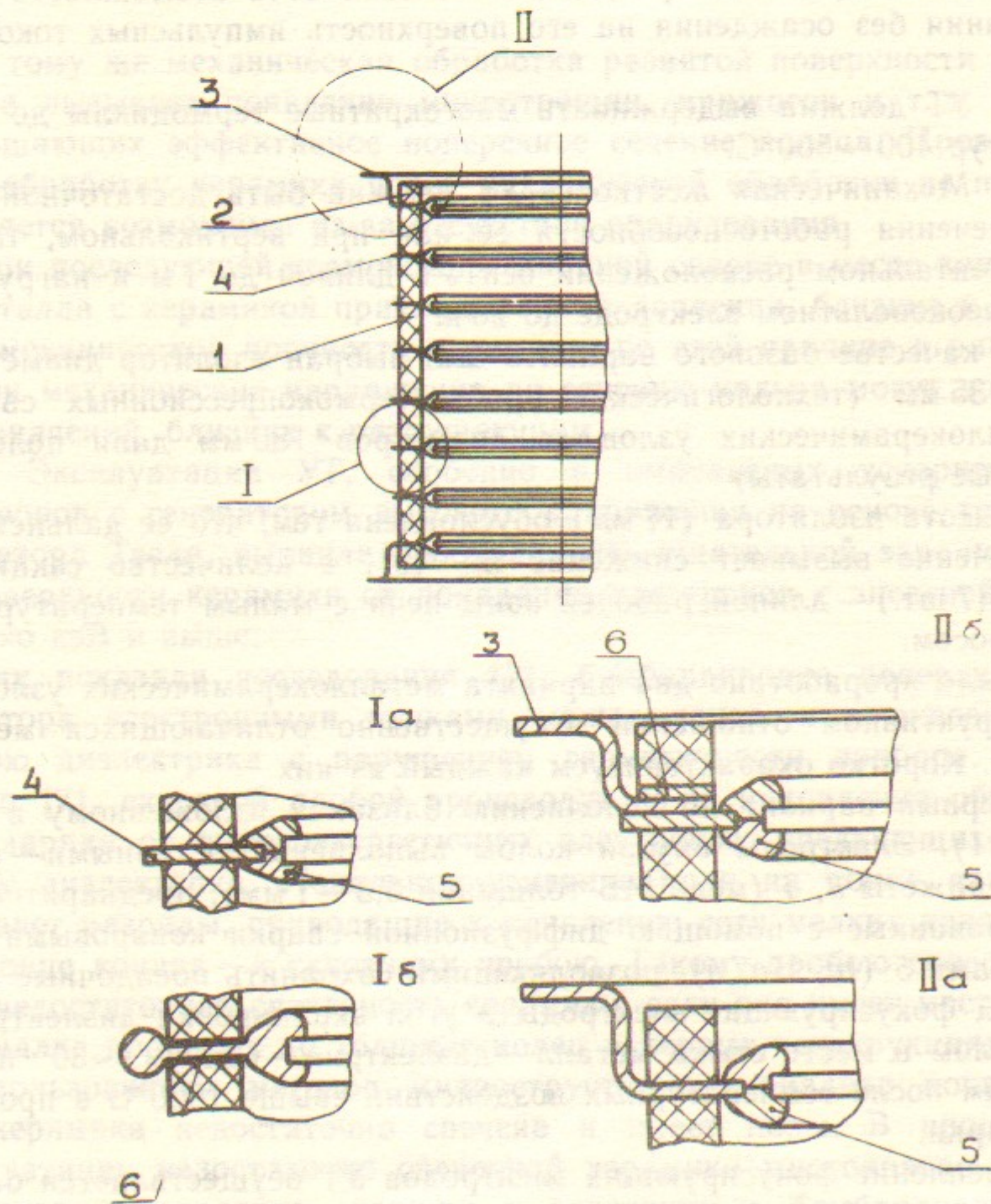


Рис. 1. Секционированный металлокерамический изолятор:

1 — керамическое кольцо; 2 — компенсатор; 3, 4 — манжеты; 5 — накладка из ковара; 6 — медная прокладка.

При отсутствии на УТ значительных изгибающих нагрузок (УТ имеет малую длину или ось трубки расположена вертикально — например, как в ПРИЗе), используется манжета из меди (IIa на рис. 1).

Для УТ, выполненной из нескольких узлов с горизонтальным расположением оси и консольной нагрузкой от веса делителей, блока управления в высоковольтной части (например, как в установке «ТРАПП», [11]), крайние манжеты выполнены из ковара, а сварка с керамическими кольцами осуществляется через медные манжеты обычного составного электрода (IIб на рис. 1). Такая конструкция обеспечивает жесткость соединения металлокерамического узла и соответственно уменьшает прогиб под действием консольной нагрузки.

К тому же при использовании крайних коваровых манжет отпадает необходимость в дополнительных приспособлениях для тепловой развязки при последующей сварке модулей между собой из-за низкого коэффициента теплопроводности ковара.

Внешний вид узла представлен на рис. 2.

Термокомпрессионная сварка узла производилась в приспособлении; центрирование деталей осуществлялось по оправке, устанавливаемой изнутри узла (от центрирования по наружному диаметру пришлось отказаться, так как такой способ не обеспечивает центрирования при температуре сварки из-за повышенного КТР оправки по сравнению с керамикой 22ХС).

Схема конструкции приспособления для сварки представлена на рис. 3.

Оправка 1 изготовлена из коваровых стержней, сваренных с коваровым фланцем (использование сборной конструкции обусловлено отсутствием коваровых заготовок нужных размеров). Чистовая обработка оправки производилась после термообработки сваренной детали.

Наружный диаметр оправки выбирался с учетом КТР оправки и электродов 3, деформации электродов при сварке и толщины прокладки 8 из предварительно отожженной в среде водорода фольги из нержавеющей стали (во избежание приварки электродов к оправке).

Центровка изоляторов 2 по стержням проводилась с помощью керамических разрезных колец — вкладышей 4.

Сжимающее усилие в процессе сварки прикладывалось через фланец со сферическим вкладышем 7, выполненным из вольфрама. Сварка осуществлялась в колпаковой печи (разработка ИЯФ СО



Рис. 2. Внешний вид изолятора.

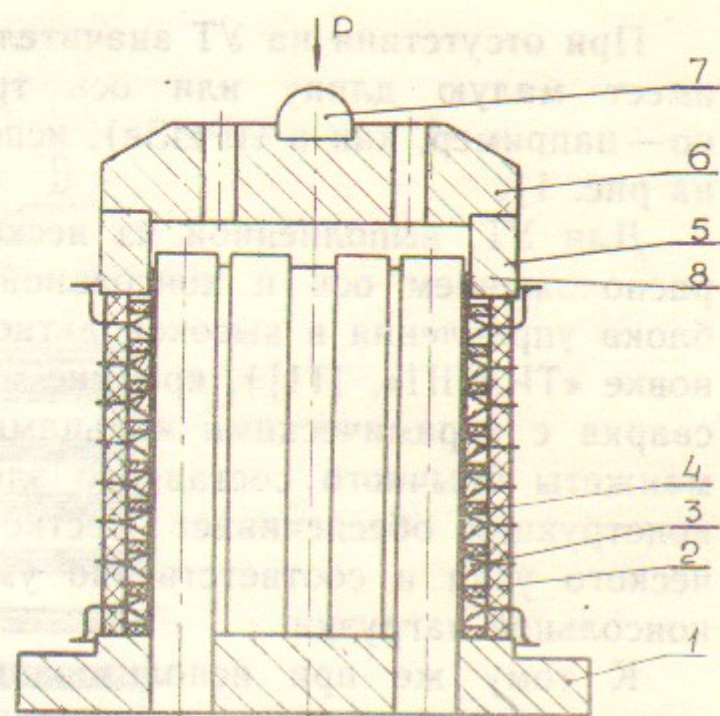


Рис. 3. Приспособление для сварки металлокерамического изолятора:
1 — оправка; 2 — изолятор; 3 — электрод;
4 — кольцо-вкладыш; 5 — опорное кольцо;
6 — фланец; 7 — сферический вкладыш.

АН СССР) в среде сухого водорода при температуре $1020 \pm 20^\circ$. Время выдержки при давлении $1,7 \cdot 10^7$ Па — 10 минут, охлаждение с печью в течение суток. По указанной технологии было изготовлено несколько десятков узлов.

Точность изготовления изделий соответствовала четвертому классу.

Один из сваренных узлов был испытан на механическую прочность. Стык нагружался изгибающим моментом $3,5 \cdot 10^2$ нм (удвоенная максимальная нагрузка на узел в процессе эксплуатации). Расчетные механические напряжения при этом достигали значений $4 \cdot 10^6$ Па.

Под действием нагрузки перемещение нагруженного фланца, измеренное индикатором, составило 0,01 мм. После недельного воздействия нагрузки показания индикатора остались неизменными. Деформации в месте закрепления и в стыках не произошло, вакуумная плотность узла сохранилась.

Высокая механическая прочность сваренных узлов позволяет в случае необходимости производить механическую обработку (шлифовку по торцам, расточку электродов) без нарушения вакуумной плотности изделия.

После изготовления модули подвергались пескоструйной обработке, очищались от остатков песка сжатым воздухом, промывались в трихлорэтилене и дистиллированной воде с ультразвуком и проходили проверку на электрическую прочность.

В процессе тренировки изоляторов постоянным напряжением на поверхности керамики с вакуумной стороны наблюдались перемещающиеся по высоте и азимуту светящиеся пятна; их интенсивность коррелировала с величиной разрядного тока, протекающего по поверхности изолятора. Со временем интенсивность свечения уменьшалась, и в конце концов исчезла совсем, уменьшался до 0 при этом ток по поверхности изолятора.

Часть изоляторов были оттренированы до напряжения 70 кВ. Цикл тренировки длился обычно несколько часов. (Время выдержки при указанном напряжении без пробоев параллельно соединенных изоляторов составило 6 часов.) Величина напряжения лимитировалась электрической прочностью по газовой изоляции. (Рабочее давление в объеме газа не более 0,5 АТИ.) При испытаниях высоковольтный источник был отвязан от объекта испытаний через высокоомное сопротивление 20 МОм, а запасаемая энергия определялась емкостью параллельно подсоединенных секций и емкостью конструкции (~ 200 пФ). Отдельный модуль был дополнительно подвергнут испытаниям при большей запасаемой энергии: 25 Дж при $U \geq 70$ кВ. В результате пробоев (~ 100) электрическая прочность изолятора упала ниже 50 кВ; при этом на изоляторах обнаружались следы пробоев и поверхностный налет. После очистки поверхности электрическая прочность изолятора восстановилась до исходной.

После электрических испытаний модули (в случае необходимости) сваривались между собой в приспособлении, обеспечивающем требуемую геометрическую точность; для модулей с крайними медными манжетами приходилось принимать меры, исключающие термоударную нагрузку на металлокерамический спай, прилегающий к месту сварки.

Часть металлокерамических узлов с тарельчатыми коваровыми манжетами (8 шт.) была отреставрирована из узлов с медными манжетами за счет растворения последних в азотной кислоте с последующей приваркой коваровых манжет. Для предотвращения попадания паров кислоты на электроды последние покрывались перед травлением кремнийорганическим лаком КО-815. С внутренней стороны колба закрывалась дополнительными крышками и герметизировалась замазкой.

После реставрации все узлы прошли испытания на вакуумную плотность и электрическую прочность.

Разработанные конструкции металлокерамических узлов нашли применение в ряде электрофизических установок. В ТРАППе — пять последовательно сваренных металлокерамических узлов представляют собой УТ, работающую при постоянном напряжении 0,8—1 МВ. Данная конструкция находится в эксплуатации с 1985 г.; в ПРИЗе-500 — УТ, выполненная из трех последовательно соединенных металлокерамических узлов, работает при напряжении до 500 кВ.

Несколько установок ПРИЗ находятся в эксплуатации на предприятиях нашей страны в течение последних трех лет.

Узлы с количеством секций 5—7 шт. используются в качестве УТ в источниках электронного пучка на напряжение 200 кВ.

С учетом положительных результатов по сварке коваровых манжет в керамике через медные прокладки была проработана более технологичная конструкция металлокерамического узла (рис. 1, 1б).

Сварка керамических колец 1 с коваровыми электродами 6, (как по торцевым, так и по промежуточным стыкам) осуществляется через медные прокладки толщиной 0,3—0,5 мм; толщина коваровых электродов в месте сварки составляет 0,3—0,5 мм.

По специальной проточке по наружному диаметру электрода осуществляется базирование как медных прокладок, так и керамических колец.

Такое усовершенствование позволяет упростить технологическую оснастку, исключить центрирующее приспособление при сварке узла.

Внутренняя кольцевая проточка служит для закрепления фокусирующих электродов УТ. Непараллельность торцов узла из семи колец после сварки не превышала 0,5 мм, а несоосность до 0,3 мм. Для повышения точности использовалась механическая обработка фланцев, приваренных к крайним манжетам после термокомпрессионной сварки.

Отдельные образцы узлов такой конструкции были подвергнуты термоциклам до 400°C; вакуумная плотность изоляторов при этом не нарушалась, не снизилась электрическая прочность.

Как уже сообщалось, при электрических испытаниях металлокерамических узлов для получения напряжений 70 кВ на секцию потребовалось несколько часов выдержки их под напряжением; по-видимому, длительный процесс тренировки был обусловлен

неоднородностью проводимости по поверхности диэлектрика и поляризационными процессами [12].

В литературе [13] описан основной механизм поверхностного пробоя в сильных электрических полях — за счет образования положительного объемного заряда на поверхности диэлектрика из-за повышенного коэффициента вторичной электронной эмиссии γ , а в литературе [14, 15, 16] предлагаются способы повышения электрической прочности поверхности изолятора за счет нанесения на нее тонких слоев полупроводящих покрытий с γ меньшим, или близким к 1. Там же приводятся результаты электрических испытаний изоляторов, покрытых различными окислами и металлами.

По рекомендациям, изложенным в [14], было использовано покрытие типа закиси меди с $\gamma = 1,25$ и удельным сопротивлением $\rho = 10^6$ Ом·см.

На внутреннюю поверхность металлокерамического узла из 7 секций (диаметром 135/150 мм и высотой 17 мм), изготовленного по описанной технологии, наносился методом напыления слой меди толщиной $\sim 200 \text{ \AA}$. Узел помещался в контейнер из нержавеющей стали, предварительно откачанный до давления ~ 50 Па, и подвергался выдержке в печи в течение 6 часов при температуре 850°C и охлаждался вместе с печью. Результаты испытаний показали, что испытательное напряжение 60 кВ было получено на параллельно соединенных секциях практически без пробоев.

Резистивное покрытие на поверхности изолятора способствует снятию осевших зарядов и ускоряет поляризационные процессы на поверхности керамики.

В целом, после соответствующей технологической проработки, обеспечивающей получение равномерных резистивных покрытий на поверхности керамики, представляется возможным отказаться от резистивного наружного делителя, обеспечивающего равномерное распределение напряжения вдоль секций на высоте изолятора.

Проблема распределения напряжения посекционно может быть в принципе решена нанесением резистивных покрытий с наружной стороны изолятора, аналогично исполнению высоковольтных пленочных сопротивлений, выпускаемых отечественной промышленностью. Эксперименты на резисторах типа КЭВ-1 и СЗ-14 показали возможность создания таких выравнивающих сопротивлений нанесением их, например, по спирали с наружной поверхности изолятора.

Литература

1. Aitken T.W. et al. The Nuclear Structure Facility at Daresbury.—NIM, 1974, v.122, N1, 2, p.235—265.
2. Вассерман С.Б., Казарезов И.В., Похлебенин Е.И., Широков В.В. Керамическая ускорительная трубка усовершенствованной конструкции.—ПТЭ, 1976, №5, с.27—29.
3. Альбертинский Б.И. и др. Ускорительная трубка на диффузионной сварке.—В кн.: Электрофизическая аппаратура. Вып.20.—М.: Энергоатомиздат, 1982, с.114—116.
4. Высоковольтные импульсные ускорители электронов Института ядерной физики (Новосибирск) для промышленных и экспериментальных целей. /С.Б. Вассерман, И.В. Казарезов, В.Ф. Куценко и др.—В кн.: Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва, 1974. Москва, 1977, т.1, с.285—287.
5. ВЛЭПП, состояние разработки модуля линейного ускорителя/В.Е. Балакин, Ю.Г. Бамбуров, О.Н. Брежнев, М.Н. Захваткин и др.—В кн.: Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1984. Дубна, 1985, т.1, с.???
6. Маркарян Л.Г., Графова В.И., Баранова З.В., Михайлова А.В. Термообработка керамики перед металлизацией.—Электронная техника, 1972, серия 6, №12, с.69—73.
7. Бочков В.Д., Погорельский М.М., Пошехонов П.В. Электрический пробой стеклянной оболочки высоковольтного прибора.—Электронная техника, серия 4, 1977, вып.5, с.50—54.
8. Девяткова Л.И. Светопропускание, как характеристика спекания керамики.—Электронная техника, 1967, сер.14, №8, с.128—133.
9. Vacuum Tubes for ELIT Type High-voltage Pulse Accelerators/S.B. Wasserman, I.V. Kazarezov, E.I. Pokhlebenin, et al. In: VII International Symposium on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum, Novosibirsk 1976. Novosibirsk, 1976, p.366—370.
10. Ускорительный технологический комплекс имплантации ионов/А.А. Авдиенко, А.Ф. Булышев, В.М. Боровиков и др.—В кн.: Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна 1986. Дубна, 1986.
11. Установка ТРАПП/В.Е. Балакин, Ю.Д. Валяев, А.Н. Скринский и др.—В кн.: Материалы V Всесоюзного совещания по применению ускорителей в народном хозяйстве: Тез. докл., Ленинград, 1985, М.: ЦНИИАТОМинформ, 1985, с.152.
12. Хамидов Н.А. Электрический разряд вдоль поверхностей твердых диэлектриков в вакууме.—Ташкент: Фан Уз.ССР, 1985, с.258.
13. Tourreil C.H., Srivastava K.D. Mechanism of Surface Charging on High-voltage Insulators in Vacuum.—IEEE Trans. Elec. Insul. 1973, v.EI-8, p.17—21.
14. Cross I.D., Sudarchan T.S. Effect of Chromium Oxide Coating on Surface Flashover of Dielectric Spacers in Vacuum.—IEEE Trans. Elec. Insul. 1974, v.EI-9, N4, p.146—150.
15. Sudarchan T.S., Cross I.D. The Effect of Chromium Oxide Coating of Surface Flashover of Alumina Spacer in Vacuum.—IEEE Trans. Elec. Insul. 1976, v.EI-11, N1, p.32—35.
16. Miller H.G. Improving the Voltage Holdoff Performance of Alumina Insulators in Vacuum through quasi-metallising.—EEE Trans. Elec. Insul. 1980, v.EI-15, N5, p.419—428.

Ю.Д. Валяев, И.В. Казарезов, А.М. Крючков

Секционированные высоковольтные
металлокерамические изоляторы
для ускорительных трубок

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

Работа поступила 17 октября 1988 г.
Подписано в печать 11.11.1988 г. МН 08579.
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1,1 печ.л., 0,9 уч.-изд.л.
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 143.

Набрано в автоматизированной системе на базе фотонаборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и отпечатано на ротапринтере Института ядерной физики СО АН СССР,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.