

04;12

Исследование распределения заряда по диэлектрической оболочке высоковольтного вакуумного прибора

© В.Д. Бочков¹, М.М. Погорельский²¹ Научно-исследовательский институт газоразрядных приборов "Плазма", 390023 Рязань, Россия² Рязанская государственная радиотехническая академия, 391000 Рязань, Россия*(Поступило в Редакцию 3 октября 1997 г. В окончательной редакции 13 мая 1998 г.)*

В рамках исследования комплекса вопросов электрической прочности разработаны методы измерения зарядов в объеме и на поверхности диэлектрической оболочки высоковольтного вакуумного прибора. С помощью этих методов измерено распределение зарядов по длине оболочки, исследовано влияние на это распределение режимов работы прибора. Выявлены закономерность образования зарядов, ее связь с появлением в приповерхностных слоях диэлектрика физических изменений структуры, исследованы и моделированы процессы изменения структуры, сопоставлено изменение электрической прочности прибора с изменением величин и знаков поверхностного и объемного заряда.

Введение

Диэлектрическая оболочка является одной из основных деталей любого вакуумного прибора. Однако такой важный параметр приборов, как электрическая прочность вакуумного промежутка, обычно не связывается с наличием и свойствами диэлектрической оболочки. Так, среди большого числа исследований, посвященных вакуумному пробоя [1], влияние диэлектрической оболочки на инициирование пробоя не рассматривается. Вместе с тем в отдельных работах обращается внимание на то, что явления, связанные со вторично-электронной эмиссией с изолирующих деталей [2,3], люминесценцией на оболочке [4], могут оказывать влияние на надежность работы вакуумных приборов. В рентгеновских трубках и водородных тиратронах одновременно с люминесценцией и пробоями вакуумного межэлектродного промежутка наблюдается и катастрофическое разрушение стеклянной или металлокерамической оболочки [5,6]. Все эти процессы связываются с облучением изолирующих элементов приборов ионными и электронными пучками.

Целью данной работы являются исследование зарядов, возникающих в диэлектрической оболочке высоковольтных вакуумных приборов, в частности рентгеновских трубок, выяснение картины распределения зарядов по длине оболочки и установление процессов, способствующих появлению электрических пробоев оболочки и снижению электрической прочности приборов. Необходимо отметить, что исследование взаимодействия пучков заряженных частиц с изоляторами имеет важное значение для решения практических задач, касающихся надежности не только высоковольтных вакуумных приборов [7,10], но и более крупных объектов, использующих изоляторы в вакуумной среде, включая ускорители, ядерные реакторы, оборудование космических станций [11,12].

Описание методов измерения

Стеклянная оболочка рентгеновских трубок подвергается действию комплекса факторов: сильных электрических полей, облучению жесткими рентгеновскими квантами, ионами и электронами, обладающими высокими энергиями. В подобных условиях в стеклянной оболочке должна возникнуть поляризация, подобная поляризации радио- и электроэлектретов [13–15].

Существует большое количество методов измерения зарядов изоляторов [16–18]. Для измерения зарядов в стеклянной оболочке рентгеновских трубок наиболее удобными оказались три, адаптированных к реальным условиям работы отпаянных высоковольтных электровакуумных приборов. Так, во время работы трубок исследование эффективного суммарного поверхностного заряда проводилось посредством измерения электростатической силы, создаваемой полем заряда [19]. Заряд, образовавшийся в объеме и на поверхности оболочки, и его распределение по длине оболочки после прибора оценивались методом измерения токов термостимулированной деполяризации (ТСДП) и методом электростатической индукции (ЭСИ) [14,20,21].

Экспериментальные макеты прибора изготавливались с оболочками из боросиликатного стекла С40-1, С49-1 (аналог Corning 7052) толщиной 1.7 ± 0.3 мм, диаметром 35–60 мм и длиной 12–18 см. В основном они повторяли конструкцию малогабаритных рентгеновских трубок. При измерении электростатической силы непосредственно во время работы под напряжением использовался макет рентгеновской трубки с размещенным в одном из высоковольтных электродов металлическим зондом (рис. 1). Его перемещение под действием поля заряда регистрировалось специальным "диодным" вакуумным преобразователем, имеющим два соединенных механически с зондом плоских анода и расположенный между ними прямонакальный катод в виде нити. Принцип действия преобразователя основан на изменении

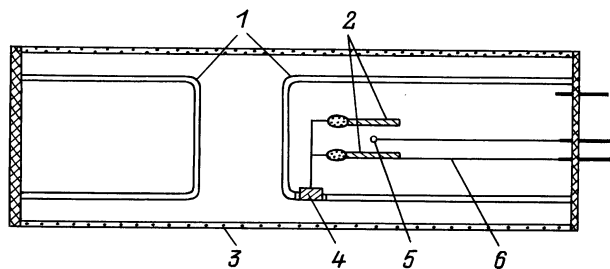


Рис. 1. Схема макета рентгеновской трубки с "диодным" преобразователем перемещения зонда: 1 — высоковольтные приборы, 2 — аноды преобразователя, 3 — стеклянная оболочка, 4 — зонд, 5 — катод преобразователя, 6 — пружина.

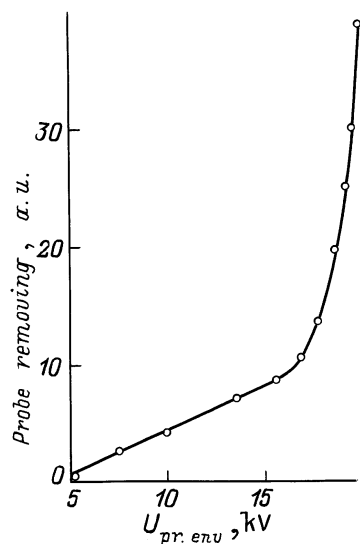


Рис. 2. Зависимость отклонения зонда с "диодным" преобразователем от напряжения между оболочкой и зондом.

токораспределения между анодами диода при перемещении зонда. Для непосредственного отсчета потенциала оболочки производилась калибровка перемещений зонда (рис. 2).

При измерении заряда на оболочке высоковольтный электрод, в котором размещался зонд, соединялся с ним электрически и мог включаться либо в качестве катода, либо анода трубки. Из рис. 2 следует, что перемещение зонда линейно зависит от напряжения в диапазоне 0–15 кВ. При дальнейшем повышении напряжения происходит резкое увеличение отклонения и затем зонд "прилипает" к оболочке. Данным способом измерялись малые (до 15 кВ) разности потенциалов между оболочкой и высоковольтным электродом макета.

Измерения заряда методом ЭСИ и ТСДП выполнялись зондами с активной площадью 1 см^2 , помещенными в высоковольтных электродах макетов рентгеновских трубок. Использовались следующие виды зондов: гибкий из тонкой ниобиевой фольги, обеспечивающей хороший контакт с поверхностью цилиндрической оболочки; экра-

нированные с экраном, защищающим от заряда, накопленного вне поверхности зонда; изолированные — зонд в этом случае изолировался от поверхности оболочки тонким слоем стекла. Использовались как стационарные, так и подвижные зонды, которые можно было помещать в любую точку оболочки.

Испытуемый макет подвергался выдержке в условиях, приближенных к реальной работе, — под высоким напряжением в масляной ванне. После отключения напряжения он вынимался из ванны, к выводу зонда подключался электростатический вольтметр. Сначала заряд измерялся методом ЭСИ. Снаружи в районе зонда к оболочке прикасались заземленным электродом. Затем зонд приводился в соприкосновение со стеклом. По напряжению на емкости вольтметра и подключенному к ней дополнительному конденсатору определяли заряд оболочки. Часто заряд, снимаемый таким образом, переходил на зонд с пробоем. Его плотность на несколько порядков превышала индуцированный заряд, характерный для электретов. Затем макет помещался в экранированную камеру, зонд устанавливался на поверхности оболочки в исследуемом месте и его вывод подключался к электрометрическому усилителю У5-6 для измерения токов ТСДП. Снаружи, напротив зонда, устанавливался заземленный медный электрод с подогревателем, обеспечивающим нагрев стекла на исследуемом участке. Скорость нагрева варьировалась от 3.7 до 16 deg/min. При этом внутренняя сторона оболочки прогревалась до 150–180°C, а наружная — до 210–240°C.

Результаты и дискуссия

1. Исследование остаточной поляризации оболочки. Экспериментальные зависимости токов, обусловленных релаксацией зарядов в оболочке, измеренные усилителем У5-6, имеют две характерные части (рис. 3). Сначала, после установки облученного макета в камеру, наблюдается разрядный ток I_1 , изменяющийся до малых значений в течение 10–60 min без нагрева оболочки. Знак его зависит от места измерения. За положительное направление принималось направление тока от облученной стороны оболочки к наружной. После включения нагрева появляется ток второго типа — ток термостимулированной деполяризации (ТСДП) I_{TSD} .

При анализе релаксационных процессов в оболочке макетов рентгеновских трубок важно знать направление протекания тока в измерительной цепи и чем оно определяется. Это позволяет судить о том, какой остаточной поляризации соответствует данный процесс. Ток ТСДП имеет разное направление при разрушении "внутренней" остаточной поляризации (гетерозаряда) и "внешней" остаточной поляризации (связанного гомозаряда) [14]. Ток смещения, который наблюдается при разрушении гетерозаряда, по своему направлению противоположен полярности заряженного диэлектрика. Гомозаряд обычно разряжается через объем образца. При этом ток ТСДП

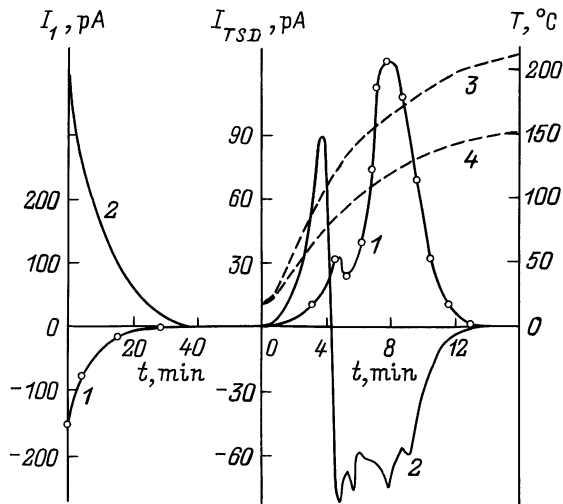


Рис. 3. Токи, снятые гибким зондом в катодной (1) и анодной (2) частях оболочки, без нагрева (I_1) и с нагревом (I_{TSD}): 3 — температура внешней, 4 — температура внутренней поверхности оболочки, напряжение на аноде 120 kV, режим работы — с разрядами в межэлектродном промежутке.

имеет противоположное направление. Если же гомозаряд выходит на электроды, то ток ТСДП имеет то же самое направление, что и ток, обусловленный разрушением гетерозаряда. Однако, применяя диэлектрические прокладки в промежутке диэлектрик-электроды, можно изменить направление тока. Экспериментальные характеристики показывают, что при наличии изоляции у зонда меняет направление только ток I_1 , направление тока ТСДП остается прежним (рис. 4).

Следовательно, разрядный ток I_1 и в катодной, и в анодной областях оболочки обусловлен процессом освобождения из поверхностных ловушек слабо связанного гомозаряда, который релаксирует без нагрева. Анализ большого количества измерений токов ТСДП позволил сделать также следующие выводы. Термостимулированный ток в катодной области всегда положителен. Он обусловлен только гомозарядом, разряжающимся через объем оболочки. В анодной области токи ТСДП, обусловленные накоплением различных зарядов, могут иметь как положительное, так и отрицательное направление. Например, при возникновении разрядов и пробоев в вакуумном высоковольтном промежутке макета в анодной области его оболочки возникает гетерозаряд, ток которого имеет положительное направление. За пиком разрушающегося гетерозаряда следует пик, обусловленный разрушением гомозаряда, разряжающимся, как и в катодной области, через объем оболочки. Активация этого гомозаряда происходит при температурах 80–120°C, что характеризует его расположение на глубоких ловушках. В оболочках приборов, работавших при напряжениях свыше 100 kV без разрядов, наблюдаются токи ТСДП, имеющие отрицательное направление и появляющиеся после тока положительной полярности при температуре

на внутренней поверхности оболочки около 120°C независимо от скорости нагрева (рис. 5).

В токах ТСДП, измеренных в анодной области с помощью изолированных зондов, подобного изменения полярности не наблюдалось. Из этого можно заключить, что токи ТСДП отрицательного направления в анодной части оболочки трубок, работавших без разрядов, являются токами отрицательных зарядов, выходящими

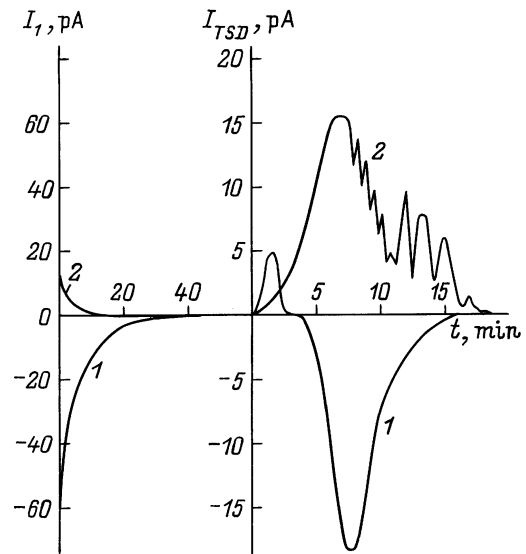


Рис. 4. Токи, снятые изолированным зондом в анодной части оболочки, без нагрева (I_1) и с нагревом (I_{TSD}): напряжение анода 100 (1), 120 kV (2); режим работы — с разрядами (1), без разрядов (2).

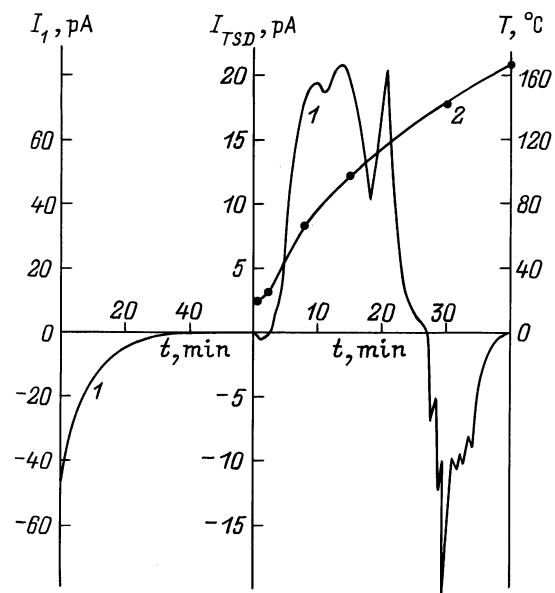


Рис. 5. Токи, снятые гибким зондом в анодной части оболочки (I_1), без нагрева (I_1) и с нагревом (I_{TSD}): напряжение анода 120 kV, режим работы — без разрядов, 2 — температура внутренней поверхности оболочки.

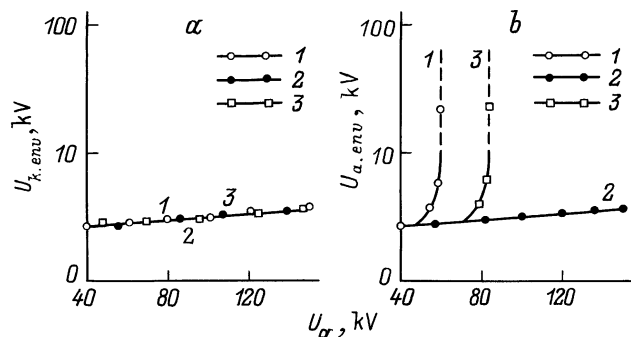


Рис. 6. Напряжение между катодом и оболочкой (а), анодом и оболочкой (б) при работе макета: 1 — при обычном включении и отсутствии разрядов, 2 — при обычном включении после возникновения разрядов, 3 — при отсутствии токопрохождения.

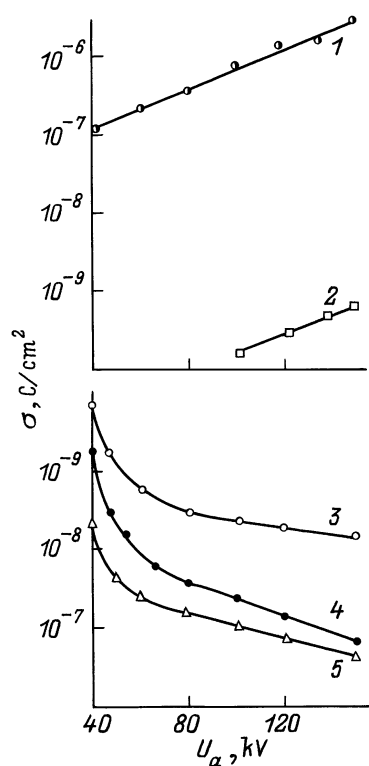


Рис. 7. Зависимости плотности поверхностного заряда оболочки от анодного напряжения после экспозиции с разрядами (1, 5), без разрядов (3) и в бестоковом режиме (2, 4) в области анода (1–3), в области катода (4, 5).

на поверхность оболочки при нагреве, т. е. обусловлены электронным объемным зарядом. Токи ТСДП обусловлены релаксацией зарядов, захваченных на сравнительно глубоких ловушках, поэтому эти заряды можно называть объемными в отличие от зарядов, снятых по методу ЭСИ, которые в основном обусловлены релаксацией поверхностного заряда и потому называемых в дальнейшем поверхностными.

2. Распределение заряда по оболочке трубок. Для выяснения процессов, приводящих к появлению различных зарядов в анодной части оболочек при изменении режима работы трубки, проводилось исследование влияния электрических полей на образование зарядов. При этом использовался макет рентгеновской трубки, имеющий зонд с "диодным" преобразователем. Измерялись потенциалы между высоковольтными электродами и оболочкой макетов как в режиме с обычным включением, так и при устранении токопрохождения между анодом и катодом. При этом на закороченные между собой катод и анод подключалось только высокое напряжение различной полярности и оболочка подвергалась воздействию электрического поля между заземленной внешней схемой и высоковольтными электродами.

Результаты измерений показывают, что значения электрических полей в анодной и катодной частях оболочки существенно различаются (рис. 6). Так, в катодной области малое отклонение зонда указывает на образование на оболочке потенциала, близкого к потенциалу зонда, т. е. к катодному. При изменении режима работы, например при увеличении токов утечки, возникновении разрядов или пробоев между катодом и анодом, потенциал оболочки в этом месте изменяется слабо. В анодной же области потенциал оболочки очень сильно зависит от режима работы. При токах утечки (токах автоэлектронной эмиссии), больших $0.05 \mu\text{A}$, электроны, попадающие на оболочку у анода, уменьшают ее потенциал, что приводит к резкому увеличению отклонения зонда уже при напряжении на аноде около 60 kV . В таком положении зонд остается до тех пор, пока в приборе не появятся разряды. При этом зонд возвращается в положение, близкое к нулевому, фиксируя малую разность потенциалов между оболочкой и анодом.

Затем после выключения напряжения заряды на оболочке этого же макета исследовались в обычном режиме и при отсутствии токопрохождения методами ЭСИ и ТСДП. Зависимости максимальных плотностей поверхностного заряда оболочки от анодного напряжения, измеренные методом ЭСИ, приведены на рис. 7. Видно, что заряд в катодной области оболочки сравнительно слабо зависит от схемы включения электродов и таким образом на образование этого заряда в большей степени оказывают влияние электрические поля, действующие в этом районе оболочки, и в меньшей степени влияет токопрохождение в промежутке. В анодной же области, наоборот, наиболее существенное влияние на заряд оболочки оказывает режим токопрохождения. Знак заряда показывает, что он обусловлен возникновением гомозаряда в соответствующих областях оболочки, т. е. отрицательным в катодной и положительным в анодной. Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что важную роль в образовании зарядов оболочки играет "внешняя" поляризация стекла в электрическом поле, создаваемом электродами трубки.

Результаты исследований согласуются с экспериментальными данными и теоретическими представлениями [14] о возникновении гомозаряда при поляризации

диэлектриков в сильных полях. Однако поляризация оболочки электровакуумного прибора имеет и свои существенные отличия от поляризации обычных электретов. Основное отличие — появление отрицательного заряда в анодной части оболочки в режиме работы трубок без разрядов.

Из сравнения зависимостей рис. 3 и 7 видно, что существуют различия (примерно на 2 порядка) и в величинах объемных и поверхностных зарядов. Однако из этого не следует существования реально большой разницы между ними, прежде всего из-за различия в условиях их измерения. Так, время, прошедшее от облучения до измерения, полученное данными методами, различное: поверхностный заряд измеряется спустя 1–2 min, а объемный — 1 h после облучения. В режиме работы прибора с разрядами, когда на поверхности появляется значительный положительный заряд, следует считаться с сильным уменьшением отрицательного объемного заряда, возникшего при облучении оболочки электронами, сразу же после выключения высокого напряжения. Данным обстоятельством объясняется и тот факт, что этот заряд фиксируется только после работы при напряжениях свыше 100 kV в режиме без разрядов (рис. 5).

Заключение

Таким образом, при работе вакуумного прибора без разрядов в анодной области потенциал оболочки несколько более отрицателен или близок к линейному закону распределения, в катодной области потенциал близок

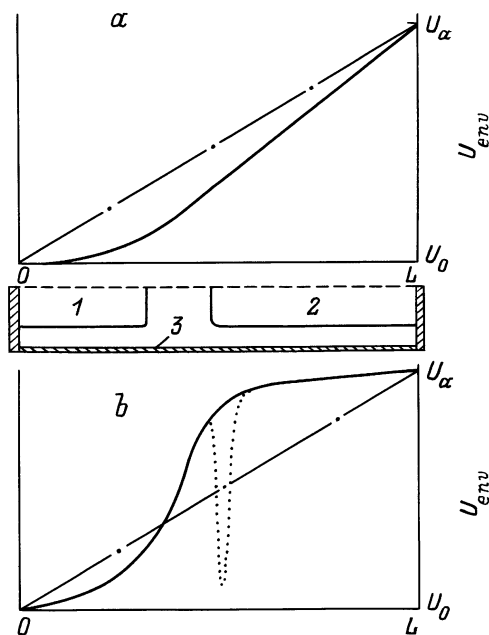


Рис. 8. Распределение потенциала по длине оболочки рентгеновской трубки в режиме без разрядов (а), в режиме с разрядами (б): штриховая линия — изменение потенциала оболочки в месте бомбардировки электронами автоэмиссии, 1 — катод, 2 — анод, 3 — диэлектрическая оболочка.

к потенциалу катода. При работе в режиме, когда в межэлектродном промежутке возникают разряды, оболочка в областях, смежных в анодом и катодом, приобретает потенциалы, близкие к потенциалам соответствующих электродов. Картина распределения потенциала по длине оболочки показана на рис. 8.

Результаты исследований показывают, что важную роль в образовании заряда оболочки играет "внешняя" поляризация стекла. Причем если в различных режимах работы вакуумного промежутка заряд в катодной области существенно не изменяется (образуется гомозаряд), то в анодной гомозаряд образуется только при появлении разрядов или пробоев в вакуумном межэлектродном промежутке. Величина этого заряда достигает $5 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2$, и потенциал оболочки в анодной области становится близким к потенциалу анода. Положительный заряд в этой области является преобладающим. При его появлении условия работы оболочки в области анода резко ухудшаются: повышается интенсивность и увеличивается энергия бомбардирующих электронов, что способствует накоплению на глубине пробега (\sim до $60 \mu\text{m}$ при 150 keV) значительных величин объемного заряда электронов. При достижении значений накопленного объемного заряда порядка 10^{-6} C напряженность его поля превышает электрическую прочность стекла, в результате чего происходят пробой приповерхностных слоев с выходом канала пробоя на внутреннюю поверхность оболочки. Таким образом, пробой оболочки жестко связан с электрической прочностью вакуумного промежутка. При работе прибора, имеющего высокую электропрочность, характеризующуюся отсутствием разрядов, отрицательный заряд оболочки у анода препятствует бомбардировке стекла, уменьшая ток автоэлектронной эмиссии с катода и понижая энергию электронов при подходе к поверхности стекла.

Список литературы

- [1] Сливков И.Н. Электроизоляция и разряд в вакууме. М.: Атомиздат, 1972.
- [2] Черепнин Н.В. Сорбционные явления в вакуумной технике. М.: Сов. Радио, 1973.
- [3] Батыгин В.Н. Вакуумная керамика. М.: Энергия, 1973.
- [4] Edelson H.D., Marks B.G. // IEEE Trans. Broadcast. And TV Rec. 1971. Vol. BTR-17. № 4. P. 264.
- [5] Рачков В.И. Электронные рентгеновские трубки. М.; Л.: ГЭИ, 1952.
- [6] Бочков В.Д., Пошехонов П.В., Погорельский М.М. // Электронная техника. Сер. 4. ЭВ и ГРП. 1977. Вып. 5. С. 50–54.
- [7] Бочков В.Д., Петров Г.Н., Погорельский М.М., Пошехонов П.В. // Электронная техника. Сер. 4. ЭВ и ГРП. 1981. Вып. 2(85). С. 26–28.
- [8] Бочков В.Д. // Электронная техника. Сер. 4. ЭВ и ГРП. 1981. Вып. 2(85). С. 11–13.
- [9] Bochkov V.D., Pogorelskiy M.M. // Proc. XVII Intern. Symposium on Disch. and Elec. Insul. in Vac. Berkeley (USA), 1996. Vol. 1. P. 548–551.

- [10] *Bochkov V.D., Pogorelskiy M.M.* // Ibid. P. 544–547.
- [11] *Gordon L.B.* Vacuum Insulation on Moon. Proc. XVI ISDEIV. M., St.-Pb., 1994. P. 459–462.
- [12] *Frederickson A.R.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. Apr. 1996. Vol. 43. P. 426–441.
- [13] *Hilczner B., Malecki J.* Electrets. Amsterdam: Elsevier, 1986.
- [14] *Губкин А.Н.* Электреты. М.: Наука, 1978. 192 с.
- [15] *Sessler G.M.* // J. Appl. Phys. 1972. Vol. 43. N 2. P. 408–411.
- [16] *Damamme G., Le Gresus C.* // Proc. XVII Intern. Symposium on Disch. and Elec. Insul. in Vac. Berkeley (USA), 1996. P. 405–409.
- [17] *Brainard J.P.* // Proc. VI Intern. Symposium on Disch. and Elec. Insul. in Vac. Swansea (UK), 1974. P. 190–194.
- [18] *De Tourreil C.H., Srivastava K.D.* // Proc. V Intern. Symposium on Disch. and Elec. Insul. in Vac. Poznan (Poland), 1972. P. 295–299.
- [19] *Бочков В.Д.* // Вакуумная и газоразрядная электроника. Межвуз. сб. Рязань, 1981. С. 77–81.
- [20] *Gross B.* // Phys. Rev. 1957. Vol. 107. N 2. P. 368–373.
- [21] *Бочков В.Д.* // Вакуумная и газоразрядная электроника. Межвуз. сб. Рязань, 1982. С. 70–73.