

**А. Г. ГУРИН**, докт. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»

**Е. А. КОРНИЛОВ**, докт. физ.-мат. наук, проф. ННЦ «ХФТИ», Харьков

**Р. С. ЛОЖКИН**, ст. преп. НТУ «ХПИ»

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИНДУКЦИОННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ КАБЕЛЬНО-ПРОВОДНИКОВОЙ ПРОДУКЦИИ

В статье рассмотрена возможность применения импульсно-периодических сильноточных индукционных ускорителей электронов в производстве кабельно-проводниковой продукции с изоляцией из радиационно-сшитого полиэтилена. Проведен сравнительный анализ с другими типами ускорителей, применяемыми для этих целей.

**Ключевые слова:** импульсно-периодический сильноточный индукционный ускоритель электронов; радиационная сшивка полиэтилена.

**Введение.** В настоящее время радиационная технология находит все более широкое применение в промышленности. В общем виде под этим термином подразумевается воздействие на вещество излучений высокой энергии с целью изменения его свойств. Основным физическим явлением, используемым при этом, является неупругое рассеяние быстрых электронов или квантов электромагнитного излучения в обрабатываемом объекте, при котором в нём образуется большое число вторичных электронов низкой энергии, происходит ионизация и возбуждение атомов, разрыв молекулярных связей, образование высокоактивных свободных радикалов. Образовавшиеся частицы — инициаторы разнообразных химических реакций, вызывающих требуемые изменения свойств облучаемого объекта: сшивку полимеров, полимеризацию мономеров, прививку молекул одного вещества к другому, деструкцию, синтез новых соединений и т.д. В радиационной технологии можно получать многие материалы с лучшими, а иногда и с качественно новыми свойствами. Одно из таких направлений — радиационная модификация полимеров электронным пучком, при которой происходит сшивка его молекул, т.е. образование поперечных связей между ними. Это приводит к значительному повышению прочности и термостойкости облучаемых изделий. Провода и кабели с такой изоляцией могут эксплуатироваться при

© А. Г. Гурин, Е. А. Корнилов, Р. С. Ложкин, 2015

более высоких температурах и токовых нагрузках, в сложных условиях, где ранее использовались провода и кабели с дорогостоящей изоляцией из фторопласта [1].

Полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид и другие полимеры обладают рядом ценных свойств, таких как низкие плотность, влагопоглощение и газопроницаемость, высокие диэлектрические показатели и химическая стойкость, что позволяет широко использовать эти материалы и для изготовления труб и различных фасонных изделий, предназначенных для строительной промышленности, нефтегазового комплекса, коммунального хозяйства, в первую очередь в водоснабжении и для отопления.

В последние годы наблюдается неуклонный рост заинтересованности в использовании полимерных трубопроводов вместо металлических, что связано с рядом их преимуществ. В процессе эксплуатации металлические трубопроводы подвергаются сильной коррозии из-за повышенной влажности, кислотности грунтов, высоких температур, что требует значительных затрат на их изоляцию и замену. Лучшими их заменителями признаны полимерные трубы с использованием радиационно-модифицированного полиэтилена [2].

**1. Сравнительный анализ устройств генерации электронных пучков.** В настоящее время для радиационной модификации наиболее широко применяются электронные пучки, генерируемые высоковольтными ускорителями постоянного тока и резонансными ускорителями. Сравнение экономических и энергетических характеристик этих ускорителей с характеристиками импульсно-периодических сильноточных индукционных ускорителей (табл. 1) [3] делает привлекательным рассмотрение возможности применения последних в радиационной технологии.

Таблица 1 - Параметры различных типов ускорителей

Параметр	Ускоритель пост. тока	Резонанс. ускоритель	Индукц. ускоритель
КПД, %	70-90	<25	50-80
Цена, долл./Вт	10-20	80-200	4-20

Также привлекательным проведение такого анализа делает тот факт, что в настоящее время в технике достигнут прогресс по нескольким направлениям:

1) разработаны высоковольтные сильноточные тиратроны нового типа (ТПИ), обладающие малым фронтом коммутации (на уровне 10 нс), способные работать с высокой рабочей частотой посылок

импульсов и имеющие большой срок службы [4], что сделало возможным разработку на их основе импульсно-периодических высоковольтных сильноточных модуляторов большой средней мощности, работающих в наносекундном диапазоне длительностей импульсов, характерном для ускорителей индукционного типа;

2) разработаны сильноточные взрыво-эмиссионные катоды с большим сроком службы [5-9];

3) разработан механически прочный и нагревостойкий углерод-углеродный композиционный материал, из которого стало возможным изготовление выпускных окон с большой рабочей площадью, позволяющей выводить в обрабатываемую среду пучки электронов вплоть до мегаваттного уровня [10, 11].

В диапазоне промышленно освоенных в настоящее время для радиационной технологии энергий электронного пучка 0,4-4 МэВ средняя мощность большинства существующих резонансных ускорителей находится в диапазоне до 100 кВт, ускорителей постоянного тока – до 200 кВт. Индукционные ускорители не имеют ограничений по максимально достижимой средней мощности пучка во всём диапазоне энергий вплоть до мегаваттного уровня. Повышение мощности пучка привлекательно с точки зрения повышения производительности установок и удешевления техпроцесса.

У большинства применяемых в настоящее время высоковольтных ускорителей постоянного тока и резонансных ускорителей в их конструкции присутствует протяженный линейный ускорительный тракт, в конце которого расположено «щелевое» выпускное окно, через которое «сканирующий» пучок выводится в атмосферу. Из-за одностороннего выведения пучка возникает необходимость в применении специальных устройств для всестороннего однородного облучения изделия, если оно имеет осесимметричную форму и большой диаметр, что достигается различными способами [12]: многократным проведением облучаемого изделия мимо выпускного окна после прохождения поворотных валиков; вращением самого облучаемого изделия вокруг своей оси при его движении вдоль выпускного окна; применением нескольких облучающих устройств, размещенных под разными углами; поворотом электронного пучка, выведенного в атмосферу, в сторону облучаемого изделия сопровождающим магнитным полем. Недостатком некоторых таких устройств является наличие неиспользуемых зон облучения («просветов») и в некоторых случаях увеличенной длины пробега электронов в воздухе. Это приводит к дополнительным

ионизационным потерям электронного пучка в атмосфере, что снижает энергоэффективность облучающего устройства.

Достоинством ускорителя индукционного типа является то, что он может быть выполнен однозорным, нагруженным на осесимметричный взрывоэмиссионный ножевой катод, если секция ускорителя выполнена крупносекционированной, в виде линейного импульсного трансформатора (рис. 1) [13, 14]. В таком ускорителе нет

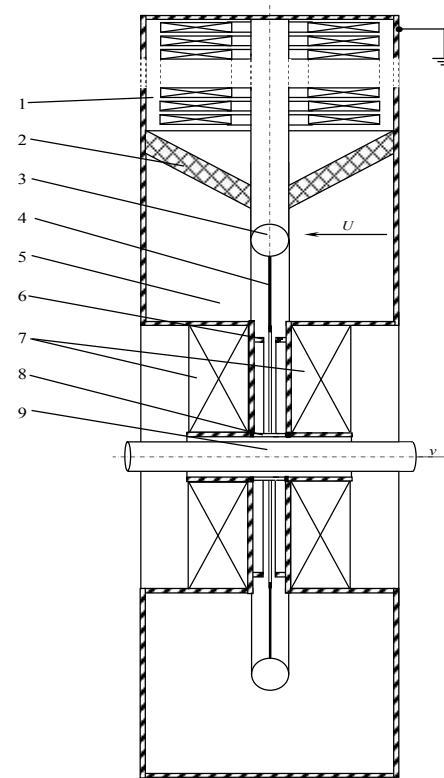


Рис. 1 – Разрабатываемое облучающее устройство на основе индукционного ускорителя электронов: 1 – секция индукционного ускорителя; 2 – вакуумный изолятор; 3 – тороидальный экран ножевого катода, подключенного к центральному электроду секции ускорителя; 4 – ножевой осесимметричный взрывоэмиссионный катод; 5 – вакуумная ускорительная камера; 6 – анодная диафрагма; 7 – катушки сопровождающего магнитного поля; 8 – окно вывода пучка из вакуума в атмосферу; 9 – облучаемое изделие.

протяженного вакуумного линейного ускорительного тракта, как в резонансных ускорителях или в ускорителях постоянного тока. Это даёт возможность создания устройств для однородного по поверхности осесимметричного облучения изделия электронным пучком за один проход. При этом пучок, выведенный в атмосферу в любой области выпускного окна, будет направлен в обрабатываемое изделие, то есть в таком устройстве нет неиспользуемых зон облучения, что обеспечивает наилучшую энергоэффективность. Другим достоинством такого устройства является возможность однородного по поверхности облучения изделий большого диаметра за один проход без применения каких-либо дополнительных вращательных механизмов.

**2. Оценка возможности применения сильноточных импульсно-периодических ускорителей электронов для облучения полиэтилена.** При облучении вещество нагревается, а сильноточный индукционный ускоритель способен ввести в обрабатываемое изделие значительные дозы облучения за время, существенно меньшее времени охлаждения материала, и поэтому для определения предельно допустимых доз облучения за один проход нами была рассчитана зависимость нагрева полиэтилена от поглощенной дозы во всём диапазоне промышленно применяемых в настоящее время доз его облучения (от 50 до 300 кГр) (рис. 2). Расчет показал, что при введении

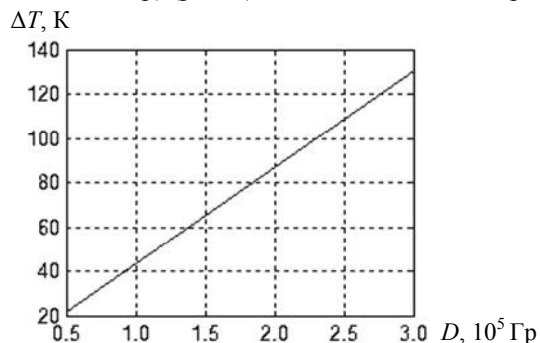


Рис. 2 – Нагрев полиэтилена в зависимости от величины «мгновенно» введенной дозы облучения  $\Delta T = D/c$  ( $c = 2300$  Дж/(кг·К) – теплоёмкость полиэтилена)

максимальной дозы – 300 кГр, материал с комнатной температуры кратковременно нагреется до температуры 170°C, что допустимо для радиационно-сшитого полиэтилена. Известно, что кратковременно он способен выдерживать температуру до 300 градусов Цельсия. В целом,

расчет показал, что схожим тепловым нагрузкам подвергается полиэтилен и при облучении другими типами ускорителей. Далее нами была рассчитана по [1] оптимальная глубина проникновения электронов в полиэтилен  $\delta(E)$  в наиболее широко освоенном диапазоне энергий электронного пучка 0,4 – 4 МэВ (рис. 3). Расчет был проведен для усредненной величины плотности полиэтилена  $\rho = 0,943$  г/см<sup>3</sup>. Оптимальная глубина проникновения электронов в полиэтилен низкой и высокой плотности отличается от рассчитанной зависимости не более чем на  $\pm 3\%$ .

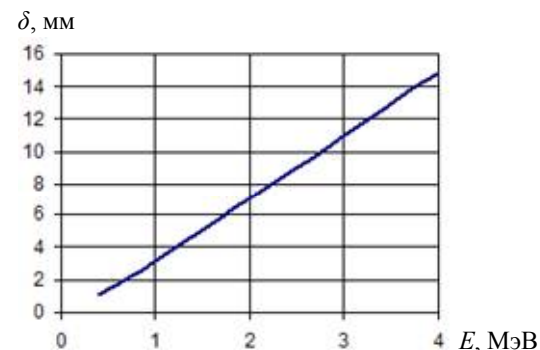


Рис. 3 – Зависимость оптимальной глубины проникновения электронов в полиэтилен от энергии электронов

Для полученного диапазона толщин и характерного для этих толщин диапазона диаметров выпускаемых изолированных проводов и водопроводных полиэтиленовых труб был проведен расчет количества импульсов, требуемого для введения в полиэтилен доз облучения 50, 100, 200 и 300 кГр (рис. 4). Расчет был произведен по формуле:

$$n(d, \delta) = \pi \cdot (d - \delta(E)) \cdot l \cdot \delta(E) \cdot \rho \cdot D / (I_n \cdot \tau \cdot E / e) \quad (1)$$

где  $d$  – наружный диаметр обрабатываемого изделия;  
 $l$  – расчетная осевая длина зоны облучения;  
 $I_n$  – величина тока пучка электронов в импульсе;  
 $\tau$  – длительность ускоряющего импульса;  
 $E$  – энергия ускоренных электронов;  
 $e$  – заряд электрона.  
 $D$  – экспозиционная доза облучения.

Расчет был проведен для параметров пучка, характерного для линейного индукционного ускорителя, имеющего КПД на уровне 80 %.

Расчет показал, что сильноточные индукционные ускорители применимы при диаметрах облучаемого изделия начиная с величины порядка 1 см и более. При диаметрах изделий значительно меньше 1 см введение пучка даже при одной только посылке способно ввести в изделие дозу, значительно превышающую 300 кГр, что может привести к деструкции полимера. Применение индукционных ускорителей для облучения изделий малых диаметров возможно при снижении величины тока пучка в импульсе, однако это снизит КПД ускорителя, что, в целом будет вести к утрате его преимуществ перед

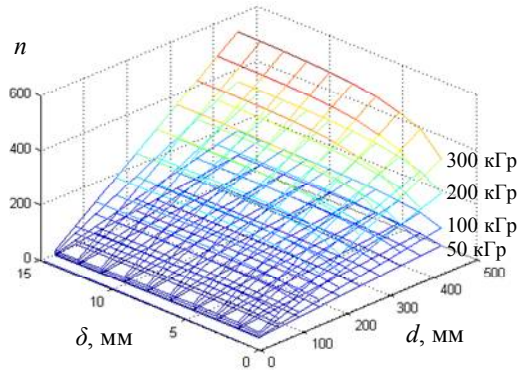


Рис. 4 – Количество посылок импульсов, требуемое для введения в полиэтилен заданных доз, в зависимости от толщины стенки и внешнего диаметра облучаемого изделия ( $I_n = 8$  кА,  $\tau = 100$  нс, осевая длина зоны облучения  $l = 30$  см)

высоковольтными и резонансными ускорителями. В целом можно сказать, что выбор ускорителя для облучения изделий малого диаметра связан с поиском оптимума с точки зрения стоимости оборудования и эксплуатационных затрат, и его следует решать исходя из того, для облучения изделий каких диаметров и какой мощностью дозы он предназначен. Также можно отметить, что наилучшим с точки зрения возможности плавного регулирования мощности дозы и минимизации скорости нагрева изделия является применение индукционного ускорителя для облучения изделий как можно больших диаметров.

Далее нами была рассчитана средняя мощность дозы, вводимой в полиэтилен, в зависимости от диаметра изделия и толщины облучаемой стенки (рис. 5). Расчет был произведен по формуле:

$$P_D(\delta, d) = D \cdot f_n / n(\delta, d) \quad (2)$$

где  $f_n$  – частота посылок ускоряющих импульсов. В нашем расчете была принята равной 125 Гц на основе номинальных данных для тиратронов типа ТПИ1-10к/50.

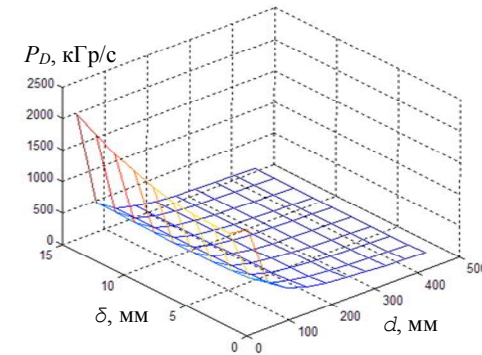


Рис. 5 – Зависимость средней мощности вводимой дозы от толщины облучаемой стенки и диаметра изделия ( $I_n = 8$  кА,  $\tau = 100$  нс,  $f_n = 125$  Гц)

Известно, что в диапазоне мощностей доз до 10 кГр/с свойства материала практически не зависят от мощности дозы, а определяются лишь величиной поглощенной дозы. При применении сильноточного индукционного ускорителя минимальная мощность дозы превышает эту величину в полученных нами расчетах в 7 раз, а максимальная – в 200 раз. Индукционные ускорители позволяют регулировать частоту посылок ускоряющих импульсов, и соответственно, и среднюю мощность дозы, что позволяет снизить среднюю мощность дозы до желаемого уровня. Однако это нежелательно, так как снизит и производительность установки. Поэтому целесообразно провести исследования, которые позволят определить максимально допустимую среднюю мощность дозы. Из имеющихся в технической литературе данных известно, что на качество облученного полиэтилена влияют как время экспозиции, так и мощность дозы облучения. Кратковременная экспозиция при значительных мощностях дозы может приводить к нежелательному окислению поверхностного слоя полиэтилена из-за его реакции с кислородом воздуха. Устраняют возможность поверхностного окисления в настоящее время следующими способами:

- 1) интенсивной продувкой воздухом области облучения с целью быстрого отведения образующегося озона;
- 2) путём облучения полимера в среде разреженного газа;

3) путём облучения полимера в среде инертного газа. Не исключено, что какой-то из этих способов окажется востребованным при больших мощностях дозы облучения.

Далее нами была рассчитана скорость движения облучаемого изделия через проектируемое облучающее устройство (рис. 6). Расчеты показали, что при облучении малыми дозами изделий с диаметром в единицы см скорость может достигать 700 м/мин. А для изделий с диаметром около полуметра, при максимальной дозе облучения – до 4 м/мин.

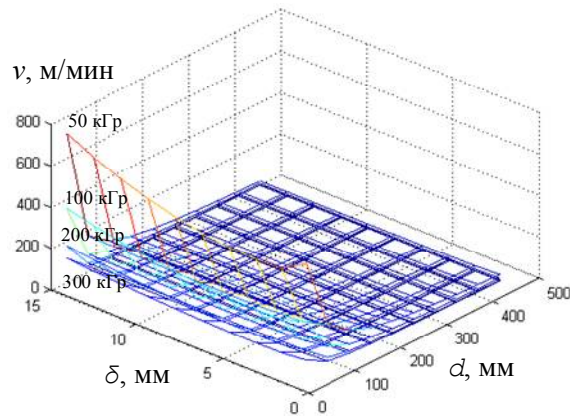


Рис. 6 – Зависимость скорости движения изделия мимо выпускного окна при различных величинах экспозиционной дозы облучения ( $I_n = 8$  кА,  $\tau = 100$  нс,  $f_n = 125$  Гц)

Также нами была определена зависимость средней мощности пучка от энергии электронов и производительность облучающей установки, в тоннах в час облученного полиэтилена (рис. 7). При расчете использовались следующие соотношения:

$$v(\delta, d) = l \cdot f_n / n(d, \delta) \quad (3)$$

$$P_{cp}(E) = I_n \cdot \tau \cdot f_n \cdot E / e \quad (4)$$

$$P_{fact}(P_{cp}) = P_{cp} / D_{max} \quad (5)$$

В расчетах было принято приближенное допущение, что вся введенная в полиэтилен энергия поглощается на оптимальной глубине проникновения. В реальности небольшая остаточная часть энергии пучка расходуется на несколько большей глубине.

Расчеты показали, что индукционный ускоритель позволяет

обеспечить производительность от 5 до 30 тонн/час, и следует отметить, что радиационная сшивка электронным пучком признана в настоящее время наименее энергозатратной по сравнению со всеми другими существующими методами сшивки (химическими, и т. д.).

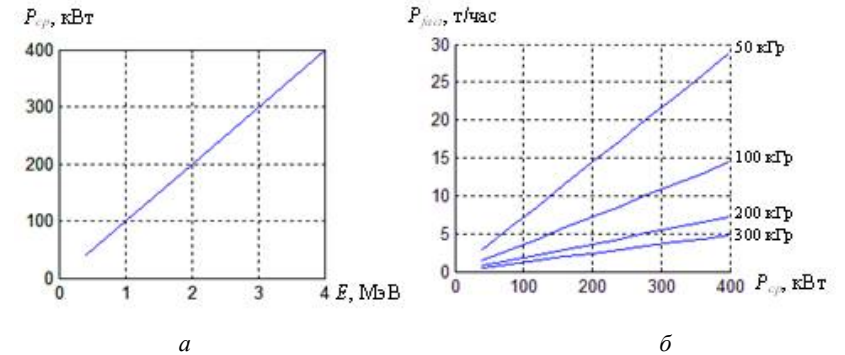


Рис. 7 – а зависимость средней мощности пучка от энергии электронов ( $I_n = 8$  кА,  $\tau = 100$  нс,  $f_n = 125$  Гц); б – производительность в зависимости от средней мощности пучка для различных значений введенных в полиэтилен доз

**Выводы.** Проведенные в данной работе аналитические исследования показывают, что использование импульсно-периодических сильноточных индукционных ускорителей электронов перспективно для радиационной сшивки полиэтилена, особенно для производства изделий больших диаметров.

Поскольку мощность дозы, вводимая индукционными ускорителями, может существенно превосходить мощности дозы, достижимые на ускорителях других типов – для обеспечения максимальной производительности целесообразно провести исследования, направленные на определение предельно допустимой мощности дозы, вводимой в полиэтилен при использовании сильноточных индукционных ускорителей. Величины предельно допустимой мощности дозы, поглощенной дозы, планируемой производительности и габаритов облучаемого изделия являются основополагающими при разработке линейного индукционного ускорителя электронов для промышленных целей и окна вывода пучка.

**Список литературы:** 1. Свинын М.П. Расчет и проектирование высоковольтных ускорителей электронов для радиационной технологии. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 144 с. 2. Шлапацкая В.В. Полимерные трубопроводы во внутренних системах центрального отопления и водоснабжения. Часть 2. / Шлапацкая В.В., Ильенко Р.Е. // Журнал С.О.К. Сантехника Отопление Кондиционирование 17.03.2005: [Электронный

ре-сурсе]. URL: <http://www.c-o-k.com.ua/content/view/64/>. (Дата обращения: 27.04.2013). **3.** R. J. Adler. Comparison of DC and Pulsed Beams for Commercial Applications. // 10th International Conference on High Power Particle Beams. June 20-24, 1994, San Diego, CA. P. 29-32. **4.** Тиратроны с холодным катодом - псевдоискровые разрядники: [Электронный ресурс] // Pulsed Technologies LTD 2004-2013. URL: [http://www.pulsetech.ru/tpi-series\\_rus.htm](http://www.pulsetech.ru/tpi-series_rus.htm). (Дата обращения: 27.04.2013). **5.** Литвинов Е.А. Автоэмиссионные и взрывные процессы при вакуумных разрядах. / Литвинов Е.А., Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. // УФН, т. 139, № 2, 1983, С. 269 – 302. **6.** Месяц Г.А. Импульсный электрический разряд в вакууме. / Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. // Новосибирск. Наука, 1984. - 242 с. **7.** Бугаев С.П. Получение интенсивных микросекундных рентгеновских пучков. / Бугаев С.П., Кассиров Г.С., Ковальчук Б.М., Месяц Г.А. // Письма в ЖЭТФ, т. 18, 1973, С. 21-26. **8.** Joda G.R. A repetitively pulsed electron beam generator. / Joda G.R., Meskaw D.A. // "Proceeding 2 International topical conference on high power electron and ion research and technology". Cornell. 1977, P. 252-273. **9.** Бугаев С.П. Электронные пучки большого сечения. / Бугаев С.П., Крейнделъ Ю.Е., Шанин П.М. // М. Энергоиздат, 1984. - 232 с. **10.** O.F. Kovpik. Carbon-Carbon Windows, Intended For Extraction Of Electron And Proton Beams From Accelerators Into Atmosphere. / O.F. Kovpik, E.A. Kornilov, V.A. Gurin, I.V. Gurin, V.V. Kolosenko, and other. // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования» (42). №1, ННЦ «ХФТИ», Украина 2004, С. 77-79. **11.** Antipov V.S. Перспективный комплекс для використання радіаційних технологій у промисловості, заснований на використанні потужного електронного пучка індукційного прискорювача з вікном виведення з вуглець – вуглецевого композиційного матеріалу. / Antipov V.S., Babich S.M., Egorov O.M., Kovpik O.F., Kornilov S.O., Kolosenko V.V., Kyselov V.A. // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования» (59), № 4(80), 2012, С. 194 -198. **12.** Финкель Э.Э. и др. Технология производства проводов и кабелей с облученной изоляцией: состояние и перспективы // Кабельная техника. 1997. № 12–13. **13.** Гурин А.Г. Баланс энергии в высокоэнергетичном линейном индукционном ускорителе. / Гурин А.Г., Ложкин Р.С. // Электротехника и электромеханика, № 1, НТУ "ХПИ", Харьков 2005, С. 83-85. **14.** Патент 60975 UA, МПК (2011.01) G21K 5/00 G01K 1/08 (2006.01) G21K 1/093 (2006.01). Пристрій для опромінення ізоляційних матеріалів електронним пучком. / Гурин А.Г., Ложкин Р.С., Корнілов С.О., Федорівська О.В. Вінокуров В.О., Гурін В.А., Колосенко В.В.; НТУ "ХПИ", u201011014; Заяв. 13.09.2011; Опубл. 25.06.2011, Бюл. № 12. **15.** Вахрушин Ю. П., Анацкий А. И. Линейные индукционные ускорители. – М.: Атомиздат, 1978. - 248 с.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Svin'in M.P. *Raschet i proektirovanie vysokovol'nykh uskoritelej jelektronov dlja radiacionnoj tehnologii.* Moscow Jenergoatomizdat, 1989. Print. **2.** Shlapackaja V.V. Polimernye truboprovody vo vnutrennih sistemah central'nogo otopenija i vodosnabzhenija. Chast' 2. / Shlapackaja V.V., Il'enko R.E. // Zhurnal S.O.K. Santehnika Otoplenie Kondicionirovanie 17.03.2005: [Jelektronnyj re-surs]. URL: <http://www.c-o-k.com.ua/content/view/64/>. (Дата obrashhenija: 27.04.2013). **4.** Tiratrony s holodnym katodom - psevdoiskrovyje razrjadniki: [Jelektronnyj resurs] // Pulsed Technologies LTD 2004-2013. URL: [http://www.pulsetech.ru/tpi-series\\_rus.htm](http://www.pulsetech.ru/tpi-series_rus.htm). (Дата obrashhenija: 27.04.2013). **5.** Litvinov E.A. Mesjac G.A. Avtoemissionnyje i vzryvnyje processy pri vakuumnyh razrjadah., Proskurovskij D.I. // UFN, t. 139, № 2, 1983, 269 – 302. Print. **6.** Mesjac G.A. Proskurovskij D.I. *Impul'snyj jelektricheskij razrjad v vakuume.* Novosibirsk. Nauka, 1984. Print. **7.** Bugaev S.P. Kassirov G.S., Koval'chuk B.M., Mesjac G.A. Poluchenie intensivnyh mikrosekundnyh rentgenovskih puchkov. *Pis'ma v ZhJeTF*, No. 18, 1973. 21-26. Print. **8.** **9.** Bugaev S.P. *Jelektronnyje puchki bol'shogo sechenija.* Moscow Jenergoizdat, 1984. Print. **10.** O.F. Kovpik.

Carbon-Carbon Windows, Intended For Extraction Of Electron And Proton Beams From Accelerators Into Atmosphere. / O.F. Kovpik, E.A. Kornilov, V.A. Gurin, I.V. Gurin, V.V. Kolosenko, and other. // Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Serija «Jaderno-fizicheskie issledovanija» (42). №1, NNC «HFTI», Ukraina 2004, S. 77-79. **11.** Antipov V.S. Perspektivnij kompleks dlja vikoristannja radiacijnih tehnologij u promislivosti, zasnovanij na vikoristanni potuzhnogo elektronnoho puchka indukcionnoho priskorjuvacha z viknom vivedennja z vuglec' – vuglecevoho kompozicionnoho materialu. *Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Serija «Jaderno-fizicheskie issledovanija»* No. 4(80), 2012. 194 -198. Print. **12.** Finkel' Tehnologija proizvodstva provodov i kabelej s obluchennoj izoljaciej: sostojanie i perspektivy // *Kabel'naja tehnika.* 1997. № 12–13. **13.** Gurin A.G. Balans jenergii v vysokojenergetichnom linejnom indukcionnom uskoritele. *Jelektrotehnika i jelektromehaniка*, No. 1, 2005, 83-85. Print. **15.** Vahrushin Ju. P., Anackij A. I. *Linejnye indukcionnye uskoriteli.* – Moscow. Atomizdat, 1978. Print

Поступила (received) 29.04.2015