

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ РАДИАЦИОННОЙ СШИВКИ ПОЛИЭТИЛЕНА

В статті розглянуто можливість застосування імпульсно-періодичних потужнострумів індукційних прискорювачів електронів для радіаційної зшивки поліетилену. Проведено порівняльний аналіз з іншими пристроями для опромінення, що застосовуються.

В статье рассмотрена возможность применения импульсно-периодических сильноточных индукционных ускорителей электронов для радиационной сшивки полиэтилена. Проведен сравнительный анализ с другими применяемыми устройствами для облучения.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время радиационная технология находит все более широкое применение в промышленности. В общем виде под этим термином подразумевается воздействие на вещество излучениями 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 нем образуется большое число вторичных электронов низкой энергии, происходит ионизация и возбуждение атомов, разрыв молекулярных связей, образование высокоактивных свободных радикалов и т.п. 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 полиэтилена 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 более высоких температурах и токовых нагрузках, в сложных условиях, где ранее использовались провода и кабели с дорогостоящей изоляцией из фторопласта [1].

Всё большее внимание в настоящее время уделяется производству и исследованиям полимерных материалов, основу которых составляют термопласты. Наиболее распространенными термопластами являются полиолефины, которые занимают ведущее место в мировом производстве полимерных труб и фасонных изделий к ним, и их выпуск ежегодно увеличивается. Полиэтилены, полипропилены, поливинилхлориды и другие полимеры обладают рядом ценных свойств, таких как низкая плотность, влагопоглощение и газопроницаемость, высокие диэлектрические показатели и химическая стойкость, что позволяет широко использовать трубы и фасонные изделия из этих полимеров в строительной промышленности, в нефтегазовом комплексе, коммунальном хозяйстве, 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. В России, в ближайшие годы, по данным исследований НПП "Маяк 93", предстоит поменять 3 млн. км металлических труб, и лучшими заменителями могут быть рекомендованы 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) с малым фронтом коммутации (на уровне 10 нс), способные работать с высокой рабочей частотой посылок импульсов и обладающие большим сроком службы [4], что сделало возможным разработку на их основе импульсно-периодических высоковольтных сильноточных модуляторов большой средней мощности в наносекундном диапазоне длительностей импульсов, характерном для ускорителей индукционного типа;

2) разработаны высокопоточные взрывоэмиссионные катоды с большим сроком службы [5-9];

3) разработан механически прочный и нагревостойкий композиционный материал, из которого стало возможным изготовление выпускных окон с большой рабочей площадью, позволяющей выводить в обрабатываемую среду пучки электронов большой средней мощности (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.

Особенностью большинства применяемых в настоящее время высоковольтных ускорителей постоянного тока и резонансных ускорителей является наличие в их конструкции протяженного линейного ускорительного тракта, 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 дополнительно снижает энергоэффективность облучающего устройства.

Достоинством ускорителя индукционного типа является то, что он может быть выполнен одноазорным, нагруженным на осесимметричный взрывоэмиссионный ножевой катод, если секция ускорителя выполнена крупносекционированной, в виде линейного импульсного трансформатора (рис. 1) [13, 14]. В таком ускорителе нет линейного вакуумного ускорительного тракта. Это даёт возможность создания устройств для всестороннего однородного по поверхности облучения осесимметричного изделия большого диаметра электронным пучком за один проход без необходимости применения дополнительных поворотных механизмов. При этом пучок, выведенный в атмосферу в любой области выпускного окна, будет направлен в обрабатываемое изделие, то есть в таком устройстве не будет неиспользуемых зон облучения, что обеспечит наилучшее использование электронного пучка, а, следовательно, и наилучшую энергоэффективность облучающего устройства.

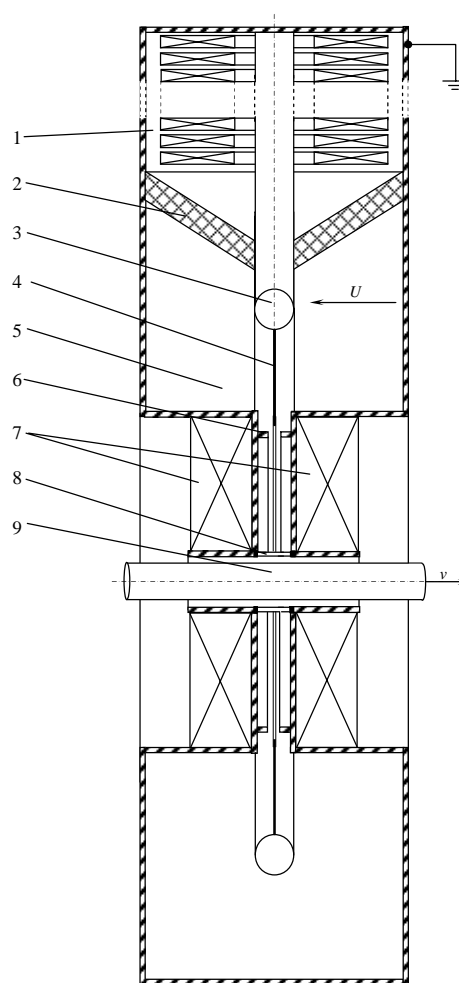


Рис. 1. Упрощенная компоновочная схема облучающего устройства на основе индукционного ускорителя: 1 – секция индукционного ускорителя; 2 – вакуумный изолятор; 3 – тороидальный экран ножевого катода, подключенного к центральному электроду секции ускорителя; 4 – ножевой осесимметричный взрывоэмиссионный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

2. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ РАДИАЦИОННОЙ СШИВКИ ПОЛИЭТИЛЕНА

При облучении вещество нагревается, а высокопоточный индукционный ускоритель способен ввести в обрабатываемое изделие требуемые дозы облучения за время, существенно меньшее времени охлаждения материала. Для определения предельно допустимой дозы облучения за один проход с точки зрения тепловой нагрузки была рассчитана зависимость нагрева полиэтилена от поглощенной дозы во всём диапазоне промышленно применяемых в настоящее время доз облучения полиэтилена (от 50 до 300 кГр) (рис. 2). Расчет показал, что при максимально допустимой величине нагрева 65 градусов (принятой из условия не довести до температуры плавления ещё не сшитый полиэтилен при температуре окружающей среды 40°C) предельно допустимая доза облучения составила $D_{max}=150$ кГр.

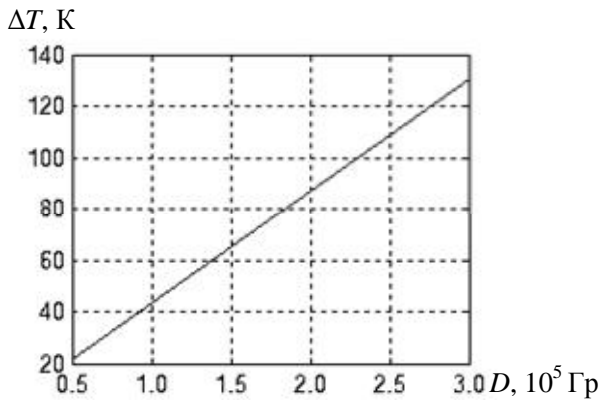


Рис. 2. Нагрев полиэтилена в зависимости от величины "мгновенно" введенной дозы облучения $\Delta T = D/c$ ($c = 2300$ Дж/(кг·К) – теплоёмкость полиэтилена)

На рис. 3 представлена зависимость оптимальной глубины проникновения электронов в полиэтилен от энергии электронов $\delta(E)$ в диапазоне энергий 0,4-4 МэВ, рассчитанная по [1] для усредненной величины плотности полиэтилена $\rho = 0,943$ г/см³. Оптимальная глубина проникновения электронов в полиэтилен низкой и высокой плотности отличается от рассчитанной зависимости не более чем на $\pm 3\%$.

Для полученного диапазона глубин проникновения и характерного для таких толщин полиэтилена диапазона внешних диаметров выпускаемых промышленностью изолированных проводов и водопроводных полиэтиленовых труб был проведен расчет количества импульсов, требуемого для введения в полиэтилен дозы D_{max} (рис. 4). Расчет был произведен по формуле:

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

здесь d – наружный диаметр обрабатываемого изделия; $l = 30$ см – расчетная осевая длина зоны облучения (принята из конструкторских соображений); $I_n = 8$ кА – величина тока пучка электронов в импульсе; $\tau = 100$ нс – длительность ускоряющих импульсов; E – энергия электронов, e – заряд электрона. Величины I_n и τ были заданы из условия обеспечить рассчитанный по [15] КПД индукционного ускорителя на уровне 70-80% при использовании в качестве ферромагнетика сплава 50 НП 10 мкм (габариты индукционной системы взяты из проектируемой конструкции).

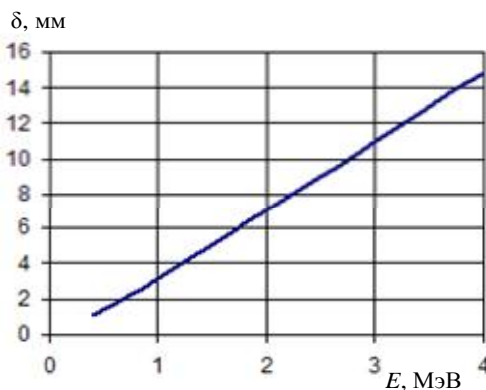


Рис. 3. Зависимость оптимальной глубины проникновения электронов в полиэтилен от энергии электронов

Расчет показал, что сильноточные индукционные ускорители наиболее применимы во всём диапазоне обрабатываемых толщин при диаметрах облучаемого изделия начиная примерно с 30 мм и более. При диаметрах изделий на уровне единиц миллиметров введение пучка даже при одной только посылке способно ввести в изделие дозу, значительно превышающую 150 кГр, что может привести к расплавлению полиэтилена. Наилучшим с точки зрения наименьшей скорости нагрева и возможности широкого регулирования мощности дозы является использование сильноточного индукционного ускорителя для облучения изделий наибольших диаметров.

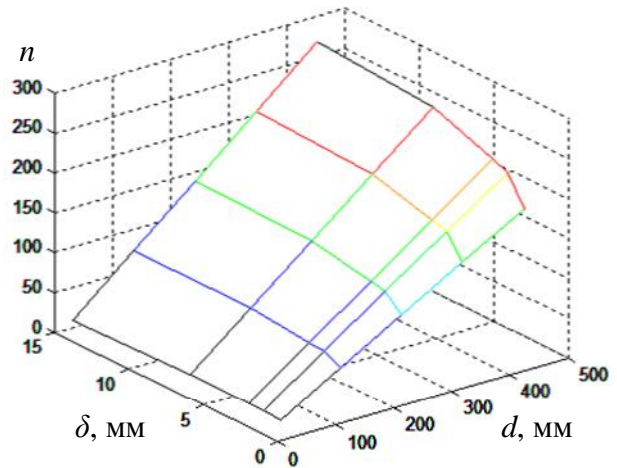


Рис. 4. Количество посылок ускоряющих импульсов, требуемое для введения в полиэтилен дозы 150 кГр, в зависимости от толщины стенки и внешнего диаметра облучаемого изделия

На рис. 5 представлены рассчитанные зависимости средней мощности пучка от энергии электронов $P_{cp}(E)$ (а), производительность облучающей установки в зависимости от средней мощности пучка электронов, введенного в полиэтилен $P_{fact}(P_{cp})$ (б) и скорость движения облучаемого изделия мимо выходного окна в зависимости от толщины и наружного диаметра облучаемого изделия $v(\delta, d)$ (в) при частоте посылок ускоряющих импульсов $f_n = 125$ Гц (принятой исходя из номинальных данных для тиратронов типа ТПИ1-10к/50). При расчете использовались следующие соотношения:

$$P_{cp}(E) = I_n \cdot \tau \cdot f_n \cdot E/e, \quad (2)$$

$$P_{fact}(P_{cp}) = P_{cp}/D_{max}, \quad (3)$$

$$v(\delta, d) = l \cdot f_n / n(d, \delta). \quad (4)$$

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 скорость движения облучаемого изделия v в рассмотренном диапазоне параметров варьируется от 8 до 240 м/мин, и тем больше, чем меньше диаметр облучаемого изделия.

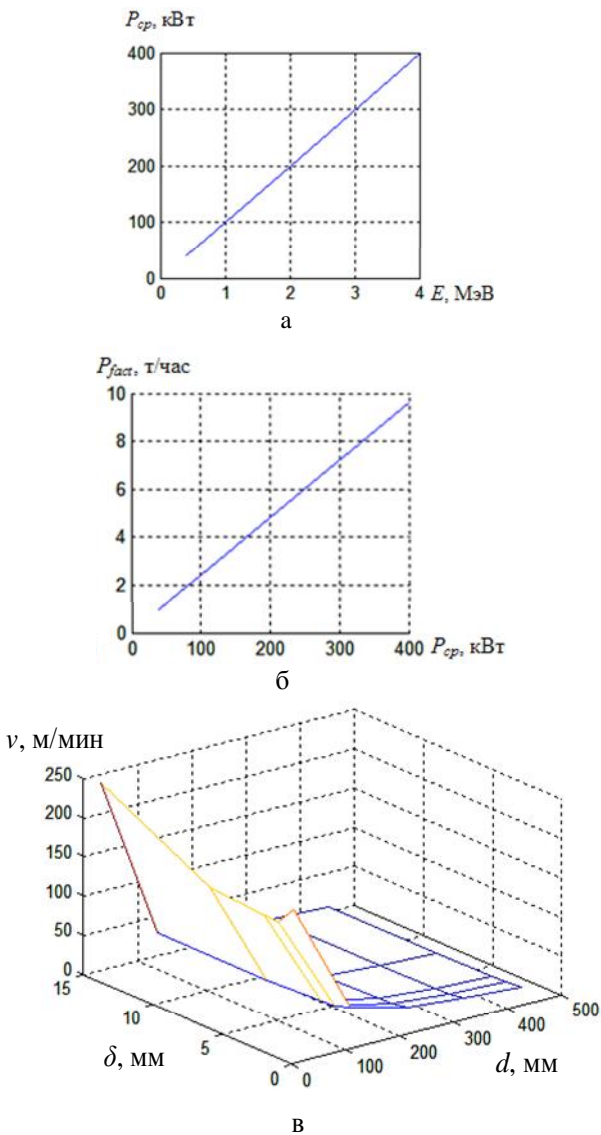


Рис. 5 Зависимости: средняя мощность пучка от энергии электронов (а); производительность от средней мощности пучка (б); скорость движения обрабатываемого изделия мимо выпускного окна в зависимости от габаритов облучаемого изделия (в)

Следует отметить, что в настоящее время слабо изучены процессы в полиэтилене, происходящие при средних мощностях дозы, значительно превышающих 10 кГр/с [1]. Рассчитанная для нашего случая минимальная средняя мощность дозы превышает эту величину в 7 раз, а максимальная – примерно в 200 раз (рис. 6). Расчет был произведен по формуле:

$$P_D(\delta, d) = D_{max} \cdot f_{п} / n(\delta, d). \quad (5)$$

Индукционные ускорители позволяют плавно регулировать частоту посылок ускоряющих импульсов, и соответственно, и среднюю мощность дозы, что позволяет снизить среднюю мощность дозы до приемлемого уровня. Однако снижение мощности дозы снизит и производительность, поэтому целесообразно провести исследования, которые позволили бы найти максимально допустимую мощность дозы с целью обеспечения максимально возможной производительности.

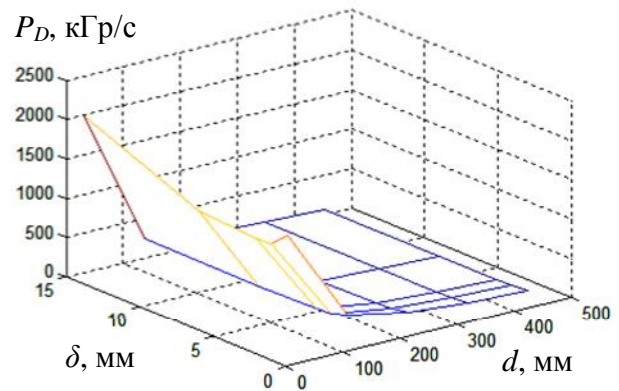


Рис. 6. Зависимость средней мощности вводимой дозы от толщины облучаемой стенки и наружного диаметра изделия

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в данной работе аналитические исследования показывают, что импульсно-периодические сильноточные индукционные ускорители электронов перспективны 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 допустимых мощностей дозы, вводимых в полиэтилен при использовании сильноточных индукционных ускорителей. Величины предельно допустимой мощности дозы, требуемой поглощенной дозы, планируемой производительности и габаритов облучаемого изделия являются основополагающими при разработке линейного индукционного ускорителя для промышленных целей и окна вывода пучка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свиньин 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 ресурс]. URL: <http://www.c-ok.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. (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. О.Ф. Ковпик. Carbon-Carbon Windows, Intended For Extraction Of Electron And Proton Beams From Accelerators Into Atmosphere. / О.Ф. Ковпик, Е.А. 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". – 2004. – С. 77-79.
11. Антіпов В.С. Перспективний комплекс для використання радіаційних технологій у промисловості, заснований на використанні потужного електронного пучка індукційного прискорювача з вікном виведення з вуглець – вуглецевого композиційного матеріалу. / Антіпов В.С., Бабіч Є.М., Єгоров О.М., Ковпик О.Ф., Корнілов Є.О., Колосенко В.В., Кисельов В.А. // 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. Гури́н А.Г. Баланс энергии в высокоэнергетичном линейном индукционном ускорителе. / Гури́н А.Г., Ложкин Р.С. // Электротехника и электромеханика. – 2005. – № 1. – 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. / Гури́н А.Г., Ложкін Р.С., Корнілов Є.О., Федорівська О.В. Вінокуров В.О., Гури́н В.А., Колосенко В.В.; НТУ "ХПІ", 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'tnyh uskoritelej `elektronov dlya radiacionnoj tehnologii. - M.: `Energoatomizdat, 1989. - 144 s. 2. Shlapackaya V.V. Polimernye truboprovody vo vnutrennih sistemah central'nogo otopleniya i vodosnabzheniya Chast' 2. / Shlapackaya V.V., P'enko R.E. // Zhurnal S.O.K. Santehnika. Otoplenie. Kondicionirovanie 17.03.2005: [`Elektronnyj resurs]. URL: <http://www.c-o-k.com.ua/content/view/64/>. (Data obrascheniya: 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. Tiratrony s holodnym katodom - psevdoskovyrye razryadniki: [`Elektronnyj resurs] // Pulsed Technologies LTD 2004-2013. URL: http://www.pulsetech.ru/tpi-series_rus.htm. (Data obrascheniya: 27.04.2013). 5. Litvinov E.A. Avto`emissionnye i vzryvnye processy pri vakuumnyh razryadah / Litvinov E.A., Mesyac G.A., Proskurovskij D.I. // UFN. - T. 139. - № 2. - 1983. - S. 269-302. 6. Mesyac G.A. Impul'snyj `elektricheskij razryad v vakuume / Mesyac G.A., Proskurovskij D.I. // Novosibirsk. Nauka, 1984. - 242 s. 7. Bugaev S.P. Poluchenie intensivnyh mikrosekundnyh rentgenovskih puchkov / Bugaev S.P. Kassirov G.S., Ko

val'chuk B.M., Mesyac G.A. // Pis'ma v Zh`ETF, t. 18, 1973, S. 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. Bugaev S.P. `Elektronnye puchki bol'shogo secheniya / Bugaev S.P., Krejndel' Yu.E., Shanin P.M. // M. `Energoizdat, 1984. - 232 s. 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. Seriya "Yaderno-fizicheskie issledovaniya" (42). №1. - NNC "HFIT". - 2004. - S. 77-79. 11. Antipov V.S. Perspektivnij kompleks dlya vikoristannya radiacijnih tehnologij u promislivosti, zasnovanij na vikoristanni potuzhnogo elektronnoho puchka indukcionnoho priskoryuvacha z viknom vivedennya z vuglec' - vuglecevoho kompozicionnoho materialu. / Antipov V.S., Babich E.M., Egorov O.M., Kovpik O.F., Kornilov E.O., Kolosenko V.V., Kisel'ov V.A. // Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Seriya "Yaderno-fizicheskie issledovaniya" (59). - № 4(80). - 2012. - S. 194-198. 12. Finkel' `E. `E. i dr. Tehnologiya proizvodstva provodov i kabelej s obluhennoj izolyaciej: sostoyaniya i perspektivy // Kabel'naya tehnika. - 1997. - № 12, 13. 13. Gurin A.G. Balans `energii v vysoko`energetichnom linejnom indukcionnom uskoritele. / Gurin A.G., Lozhkin R.S. // Elektrotehnika i elektromehaniка. - 2005. - № 1. - S. 83-85. 14. Patent 60975 UA, MPK (2011.01) G21K 5/00 G01K 1/08 (2006.01) G21K 1/093 (2006.01). Pristrij dlya oprominennya izolyacijnih materialiv elektronnim puchkom. / Gurin A.G., Lozhkin R.S., Kornilov E.O., Fedoriv'ska O.V. Vinokurov V.O., Gurin V.A., Kolosenko V.V.; NTU "HPI", u201011014; Zayav. 13.09.2011; Opubl. 25.06.2011, Byul. № 12. 15. Vahrushin Yu. P., Anackij A. I. Linejnye indukcionnye uskoriteli. - M.: Atomizdat, 1978. - 248 s.

Поступила 17.05.2013

Гури́н Анатолий Григорьевич, д.т.н., проф.,
Ложкин Руслан Сергеевич
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
кафедра "Электроизоляционной и кабельной техники"
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21
тел. (057) 7076663, e-mail: AGurin@kpi.kharkov.ua

Корнілов Евгений Александрович, д.ф.-м.н., проф.
Институт плазменной электроники и новых методов
ускорения Национального научного центра
"Харьковский физико-технический институт"
61108, Харьков, ул. Академическая, 1
тел. (057) 7001523, e-mail: Kornilov@kipt.kharkov.ua

Gurin A.G., Kornilov E.A., Lozhkin R.S.
**Prospects of high-current electron beams application
to radiation polyethylene cross-linking.**

A possibility of applying a pulse-periodic high-current induction electron accelerators to radiation polyethylene cross-linking is considered in the article. A comparative analysis with other devices used for irradiation is made.

**Key words – high-current induction accelerator of electrons,
radiation polyethylene cross-linking.**