

Развитие электронно-лучевой технологии в электроизоляционной и кабельной технике

Э.Э. ФИНКЕЛЬ, доктор техн. наук, Г.И. МЕЩАНОВ, Е.И. МИРОНОВ

АО «ВНИИКП»

В.Л. АУСЛЕНДЕР, В.Е. НЕХАЕВ, Р.А. САЛИМОВ

ГНЦ РФ «Институт ядерной физики СО РАН»

Вторая половина XX века характеризуется возникновением, развитием и становлением трех принципиально новых научно-технических направлений:

— ядерной энергетики (ядерные энергетические установки для атомных электростанций и крупных судов надводного и подводного плавания);

— ракетно-космической техники и сверхзвуковой реактивной авиации;

— информатики и связи.

Это обусловило потребность в кабельных изделиях, удовлетворяющих комплексу новых, более жестких, а подчас и специфических требований, в том числе повышенной надежности при монтаже и эксплуатации наряду с миниатюризацией; повышенной нагревостойкости как кратковременной, так и длительной; радиационной стойкости.

Начиная с 1957 г. в АО «ВНИИП» были развернуты работы по исследованию поведения традиционных электроизоляционных полимерных материалов, в первую очередь полиэтилена, в специфических условиях эксплуатации, выявлены некоторые нетривиальные эффекты и возможность использования ионизирующих излучений высокой энергии для модифицирования свойств полимеров, в частности, их радиационного сшивания.

В 1958 г. началось многолетнее творческое сотрудничество АО «ВНИИКП» и ГНЦ «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» по систематическому изучению радиационно-химических превращений в полимерах, механизма их радиационного сшивания и исследованию свойств и эксплуатационных характеристик радиационно сшитых полимеров в зависимости от индивидуальности химического строения цепи и условий и режимов облучения.

Анализ обширного массива накопленных экспериментальных данных [1, 2] привел к следующим основным выводам:

— облучение кабельных композиций промышленного полиэтилена ионизирующими излучениями высокой энергии в оптимальных условиях (поглощенная доза излучения, среда при облучении) благодаря радиационному сшиванию обеспечивает придание изделиям формоустойчивости при температурах, превышающих температуру плавления исходного термопластичного материала, повышение нагревостойкости и применительно к изоляциям кабельных изделий позволяет повысить температуру длительной эксплуатации с 75–80 до 100–105°C (при дальнейшем повышении температуры резко возрастает скорость окисления и, как следствие, быстро утрачивается эластичность), а также увеличить надежность кабельных изделий при кратковременном повышении температуры до 250°C (стойкость к продавливающим нагрузкам) в случае коротких замыканий или токовых перегрузок. Это само по себе уже является практически важным результатом и оправдывает про-

мышленное применение, однако не исчерпывает возможностей радиационного сшивания как метода получения нагревостойких электроизоляционных материалов, потенциально конкурентоспособных по сравнению с другими термостойкими полимерами, более дорогостоящими и менее технологичными;

— накопленные данные о влиянии условий облучения на конечные эксплуатационные свойства продукта и его длительную работоспособность при повышенных температурах подтвердили возможность применения для радиационного модифицирования полиэтиленовой (или другой сшивающейся) изоляции как изотопных источников гамма-излучения, так и ускорителей электронов; однако в первом случае технологический процесс, как правило, должен быть периодическим (из-за сравнительно низкой мощности дозы облучения необходимо проводить в бескислородной среде для предотвращения радиационного окисления), тогда как во втором случае он может быть непрерывным (высокая мощность дозы допускает облучение на воздухе вследствие диффузионных ограничений на деструктурирующее влияние кислорода);

— метод радиационного сшивания может приобрести более существенное практическое значение, если удастся создать композиции полиэтилена, защищенные химически от вредного влияния кислорода воздуха в процессе длительной эксплуатации при повышенных температурах (более 100–105°C), т.е. создать методы термостабилизации радиационно сшитых полимеров.

Схематически основные направления и этапы работ, выполненных на пути от «пробирочных» экспериментов до внедрения электронно-лучевой технологии на кабельных заводах, показаны на рис. 1.

По-существу техническая и экономическая целесообразность радиационного модифицирования полимеров в электроизоляционной и кабельной технике



Рис. 1. Основные направления и этапы работ в области создания электронно-лучевой технологии применительно к задачам электроизоляционной и кабельной техники

образность промышленной реализации электронно-лучевой технологии, уже свыше 25 лет применяемой при производстве нагревостойких проводов, кабелей и электроизоляционных термоусаживаемых установочных изделий в нашей стране, предопределены решением четырех ключевых проблем:

— разработаны ускорители электронов (типов ЭЛВ и ИЛУ), обладающие приемлемыми физико-техническими характеристиками и достаточной надежностью наряду с простотой эксплуатации в условиях промышленного производства продукции (Институт ядерной физики СО РАН) [3];

— развиты принципы термостабилизации радиационно сшитых полимеров и на их основе разработаны рецептуры электроизоляционных, электропроводящих и шланговых композиций, обладающих длительной работоспособностью при температурах выше 105°C (АО «ВНИИКП» совместно с ГНЦ «НИФХИ им. Л.Я. Карпова», АО «Пластополимер» и НИИХТ полимеров им. В.А. Каргина) [4, 5];

— разработаны различные модификации подпучкового технологического оборудования, транспортирующего гибкие протяженные изделия (провода, кабели, трубы) через выведенный в атмосферу пучок электронов и формирующего расположение объекта облучения в заполненной этим пучком зоне пространства; это оборудование обеспечивает удовлетворительную равномерность поглощенной дозы излучения в объеме полимерного материала при практически приемлемом значении доли полезно используемой мощности пучка электронов (АО «ВНИИКП») [6, 7];

— разработана система очистки вентиляционных выбросов, обеспечивающая экологическую безопасность электронно-лучевой технологии (АО «ВНИИКП» совместно с ДФ ВНИИОГАЗ) [8].

С использованием широкого ассортимента разработанных полимерных композиций, оборудования и технологических принципов на шести заводах электротехнической промышленности с применением ускорителей электронов типов ЭЛВ-1, ЭЛВ-2, ЭЛВ-4 и ИЛУ-8 (энергия электронов до 1,5 МэВ, мощность в пучке 20—50 кВт) к 1985 г. функционировали 16 технологических линий, на которых с применением элек-

тронно-лучевой технологии было организовано производство нагревостойких проводов и кабелей различного назначения, а также электроизоляционных термоусаживаемых установочных изделий [9, 10].

Эксплуатационные характеристики некоторых электроизоляционных полимерных композиций, специально предназначенных для радиационного сшивания, приведены в табл. 1 в сравнении с характеристиками облученного промышленного полиэтилена кабельной марки 153-01К. При близких значениях физико-механических свойств работоспособность специальных композиций при повышенных температурах (более 105°C) на 1,5—2,0 порядка выше, чем промышленного облученного кабельного полиэтилена.

В ассортименте разработанных для радиационного сшивания полимерных электроизоляционных композиций имеются материалы с улучшенной технологичностью (например, композиции 108—273 и 108—274 требуют в 2,0—2,5 раза меньшей технологической дозы по сравнению с обычным кабельным полиэтиленом и обладают при этом существенно более высокой работоспособностью при повышенных температурах), с повышенной радиационной стойкостью (композиция 102—57), а также не поддерживающие горение (композиции 158—257 и 206—106).

С применением электронно-лучевой технологии освоено производство широкого ассортимента нагревостойких проводов, кабелей и установочных электроизоляционных термоусаживаемых изделий, обладающих повышенной надежностью при эксплуатации, в том числе монтажные и установочные провода; малогабаритные кабели управления; контрольные и измерительные кабели, в том числе с термоэлектродными жилами; нагревательные провода; силовые кабели; бортовые авиационные провода; судовые кабели, в том числе продольно герметизированные; коаксиальные кабели; кабели, провода и установочные термоусаживаемые изделия электроизоляционного назначения для атомных электростанций, в том числе для использования в гермозоне АЭС, и др.

Основная задача при разработке аппаратного оформления технологического процесса радиационного сшивания полимерных изделий (выбор источников из-

Таблица 1

Показатель	Промышленный полиэтилен 153-01К по ГОСТ 16336-77	Композиции на основе полиэтилена				
		108—273	108—274	102—57	158—257	206—106
Технологическая доза, МГр	0,50	0,25	0,20	1,0	0,35	0,10
Относительное удлинение ϵ при разрыве, не менее, %	350	450	400	400	400	500
Прочность при разрыве, σ , не менее, МПа	13,0	13,0	13,0	13,0	10,0	17,0
Сохранение ϵ и σ после теплового старения в течение 7 суток, не менее (ϵ/σ),						
при 175°C	—	100/100	75/100	80/100	100/100	—
при 150°C	75/100	100/100	100/100	100/100	100/100	80/100
при 136°C	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100
Кислородный индекс, %	18,0	18,0	18,0	18,0	28,0	25,5
Работоспособность*, ч, не менее,						
при 200°C	—	75	75	150	—	—
при 175°C	10	500	500	700	300	—
при 150°C	100	3000	3000	7000	3000	500
при 120°C	—	10000	10000	12000	—	5000
при 105°C	500	20000	20000	Длительно	—	10000
Радиационная стойкость*, не менее МГр	0,20	1,0	1,0	6,0	0,75	0,10

* Критерий — снижение ϵ до 100%.

лучения достаточной мощности с требуемой проникающей способностью излучения и конкретный способ организации зоны облучения, т.е. компоновка и конструкция технологического оборудования, определяющие физические и геометрические условия взаимодействия излучения, генерируемого данным источником, и облучаемого объекта) сводится к достижению равномерного распределения поглощенной дозы излучения в объеме сшиваемого материала, т.е. обеспечению допустимой степени неравномерности поглощенной дозы излучения.

Решение это задачи применительно к изоляции (оболочке) провода (кабеля) осложняется по крайней мере двумя обстоятельствами:

— распределение поглощенной дозы излучения по толщине материала в направлении падения пучка электронов неравномерно и подчиняется закону, характеризующемуся немонотонной зависимостью;

— из-за цилиндрической конфигурации провода (кабеля) толщина изоляции (оболочки) в направлении падения пучка электронов не постоянна и меняется по определенному закону, также характеризующемуся немонотонной зависимостью.

Для достижения требуемого комплекса свойств облучаемого изоляционного материала необходимо, чтобы в любом элементе его объема была поглощена доза излучения не ниже некоторой заданной, называемой минимальной технологической дозой. Поэтому (в силу отмеченных обстоятельств) часть материала оказывается переоблученной. Степень переоблучения необходимо минимизировать, так как набор избыточной дозы влечет за собой ухудшение эксплуатационных свойств материала и приводит к неоправданным затратам энергии. С этой целью, как правило, применяют многостороннее облучение, комбинируя различные схемы технологических линий не только с одним, но и с несколькими излучателями [11].

На рис. 2 показаны некоторые технологические схемы облучения кабельных изделий, а на рис. 3 — частично заимствованные из [12] и полученные авторами данные о распределении поглощенной дозы излучения в изоляции кабеля при многостороннем и круговом

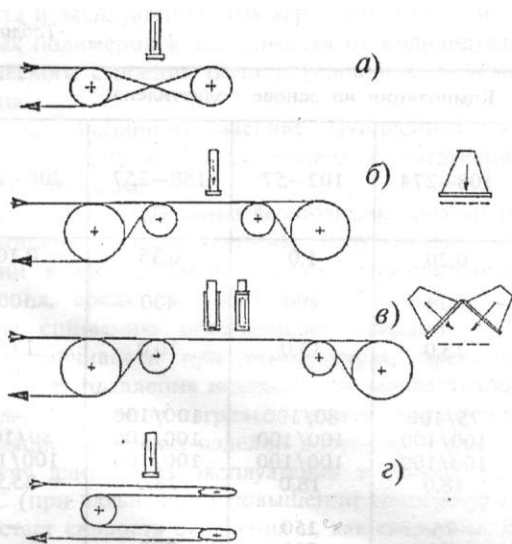


Рис. 2. Схемы технологических линий для различных способов облучения кабельных изделий:

а — двухстороннее облучение в виде «восьмерки»; б — двухстороннее облучение в одной плоскости; в — четырехстороннее облучение с помощью двух ускорителей электронов, установленных под углом 45° к плоскости перемотки кабельного изделия; г — четырехстороннее облучение с поворотом направления перемотки кабельного изделия

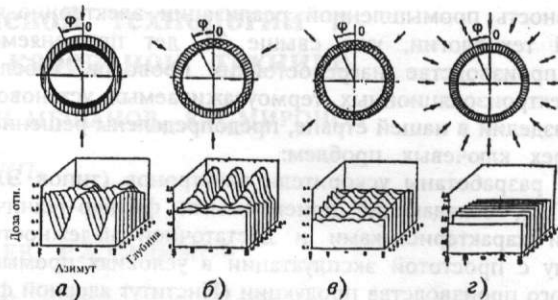


Рис. 3. Распределение поглощенной дозы излучения в изоляции кабеля при:

а — двухстороннем; б — трехстороннем; в — четырехстороннем; г — круговом облучении в идеальных условиях (без учета твиста)

облучении в идеальных условиях, т.е. без учета «твиста» (произвольное вращение кабеля при перемотке относительно его продольной оси, обусловленное его жесткостью). Зачерненная площадь жилы кабеля характеризует часть энергии пучка электронов, поглощенную жилой.

В табл. 2 приведены результаты расчета некоторых параметров, характеризующих технологический процесс электронно-лучевой обработки изоляции кабеля при использовании разных схем облучения применительно к двум типам изделий. Даны необходимая в каждом случае энергия электронов E , отношение максимальной поглощенной дозы излучения D_{\max} к минимальной D_{\min} , затраты энергии пучка электронов на облучение 1 км кабеля W_{\min} , в том числе энергии, затрачиваемой на переоблучение материала W_{ins} и поглощенной в жиле кабеля W_{cond} , полные энергозатраты W_{tot} и полные энергозатраты при круговом облучении $W_{\text{tot},o}$. Расчет проведен при значении минимальной поглощенной технологической дозы излучения, равной 10 Мрад (0,1 МГр) без учета «твиста».

Таблица 2

Параметр	Круговое	Четырех- стороннее	Трехсто- роннее	Двухсто- роннее
Кабель: жила диаметром 1 мм, изоляция толщиной 1 мм				
E , МэВ	0,5	0,55	0,61	0,7
D_{\max}/D_{\min}	1,2	1,32	2,1	2,9
W_{\min} , кДж	620	620	620	620
W_{ins} , кДж	37	62	112	198
W_{cond} , кДж	50	75	149	428
W_{tot} , кДж	707	757	881	1246
W_{tot}/W_{\min}	1,14	1,22	1,42	2,01
$W_{\text{tot}}/W_{\text{tot},o}$	1	1,07	1,25	1,76
Кабель: жила 150 мм^2 , толщина изоляции 1,4 мм				
E , МэВ	0,65	0,75	0,90	1,45
D_{\max}/D_{\min}	1,15	1,29	2,3	3,5
W_{\min} , кДж	6800	6800	6800	6800
W_{ins} , кДж	610	1160	4500	8500
W_{cond} , кДж	680	1970	9100	21900
W_{tot} , кДж	8090	9130	20400	37200
W_{tot}/W_{\min}	1,19	1,46	3,0	5,47
$W_{\text{tot}}/W_{\text{tot},o}$	1	1,24	2,52	4,6

Данные расчета показывают, что в случае относительно тонких изделий приемлемое качество облучения и достаточная экономичность могут быть достигнуты при двухстороннем облучении, тогда как для крупногабаритных изделий этот способ облучения приводит к низкому качеству обработки и повышенному расходу энергии. Связано это с тем, что при двухстороннем облучении даже строго с противоположных

сторон пространственная неоднородность поглощенной дозы излучения в изоляции весьма высока, а «твист» при обработке еще усугубляет эту неоднородность [12].

При заданной толщине изоляции минимальная энергия электронов требуется при четырехстороннем или круговом облучении. Применение таких схем облучения позволяет также минимизировать ток пучка электронов (т.е. снизить требуемую мощность источника), так как отношение максимальной дозы к минимальной в этих случаях наиболее выгодно.

Как показывает опыт, двухстороннее облучение при многопроходной схеме перемотки обеспечивает достижение приемлемой равномерности поглощенной дозы излучения в пределах объема изоляции при используемых энергиях электронов до 1,5 МэВ, ограниченных значениях наружного диаметра и толщины изоляции кабельного изделия. Однако при этом неизбежны потери электронов как за счет «пролета» их между соседними витками перематываемого под пучком кабельного изделия, так и вследствие неполного поглощения электронов в изоляции (оболочке), связанного с цилиндрической формой изделия.

С целью более эффективного использования мощности пучка электронов разработаны и внедрены в промышленную практику [7, 13, 14] различные модификации электромагнитных систем, располагаемых под выпускным раструбом ускорителя и формирующих такую топографию магнитного поля, которая обеспечивает возвращение к объекту облучения не поглощенных им электронов. При этом из-за возврата «пролетных» электронов к объекту облучения и вхождения их в его поверхность под различными углами возрастает эффективность использования мощности пучка (что позволяет в 1,5–2,0 раза повысить линейную скорость перемещения изделия под пучком) и улучшается равномерность распределения поглощенной дозы излучения в объеме изоляции (оболочки), т.е. повышается качество изделия.

С учетом необходимости удовлетворения потребностей разных отраслей промышленности в нагревостойких проводах и кабелях повышенной надежности и, соответственно, достаточно широкого их ассортимента, при создании радиационно-технологических установок, как правило, исходили из принципа их достаточной универсальности и ограничивались, в основном, электронно-лучевой обработкой кабельных изделий сравнительно небольших габаритных размеров.

Вместе с тем, в последние годы не только возник интерес к применению электронно-лучевой технологии в производстве крупногабаритных кабельных изделий, в частности, силовых кабелей достаточно больших сечений, но и появились для этого новые технические возможности. Этот интерес стимулируется появлением и все более широким использованием принципиально новых электроизоляционных полимерных материалов — безгалогенных композиций на основе полиолефинов, которые не только являются трудногорючими, т.е. не распространяют пламя, но и удовлетворяют наиболее жестким международным требованиям по комплексной пожаробезопасности, поскольку для них характерны весьма низкие уровни выделения дыма, коррозионно активных и токсичных продуктов при воздействии открытого пламени. Применение таких материалов существенно повышает технический уровень кабельных изделий. Например, производство силовых кабелей с изоляцией и оболочкой из безгалогенных композиций в сочетании с электронно-лучевой технологией их сшивания представляет собой яркий пример «высокой тех-

нологии» в кабельной технике, имеющей явные преимущества перед традиционными методами. Именно такой подход обеспечивает наиболее экономичное и технически совершенное направление существенного повышения пожаробезопасности кабельных трасс на крупных промышленных (атомные и тепловые электростанции, химические и металлургические производства и т.п.) и коммунальных (метрополитен, высотные административные и жилые здания, сооружения культурно-зрелищного назначения, гостиницы и т.п.) объектах.

Из сказанного очевидно, что для получения качественной изоляции крупногабаритных изделий необходимо применять ускорители с достаточно высокой энергией электронов и схемы кругового или четырехстороннего облучения.

Круговое облучение (рис. 4) можно осуществить вращением кабеля относительно его продольной оси в процессе перемотки под пучком, т.е. синхронным вращением отдающего и приемного устройств. Такие схемы реализованы в мировой практике, но весьма громоздки и требуют для размещения оборудования больших производственных площадей. Более рациональным решением является применение поворачивающих магнитов, располагаемых под выпускным раструбом ускорителя и сводящих пучок электронов, выведенный в атмосферу через традиционную линейную развертку, в одну точку [15]. Понятно, что как в том, так и в другом случае возможна только однопроходная схема облучения.

Реализация кругового облучения силовых кабелей больших сечений может быть осуществлена по той или иной схеме с применением, например, ускорителя типа ЭЛВ-8 с непрерывным пучком, с энергией электронов 1,0–2,5 МэВ и мощностью в пучке до 80 кВт.

Четырехстороннее облучение кабельных изделий, в том числе и достаточно крупногабаритных, может быть осуществлено с использованием ускорителя типа ИЛУ. Импульсный характер электронного пучка позволяет переключать его без потерь в различные каналы и, используя специальную конструкцию выпускного раструба [16] с четырьмя окнами, осуществлять облучение четырьмя пучками электронов, генерируемыми одним ускорителем (рис. 5). На рис. 6 показана схема технологической линии для четырехстороннего облучения кабеля под четырьмя выпускными окнами. Электронный пучок выпускается через каждое окно под углом 45° к плоскости перемотки кабеля, а облучение на двух уровнях позволяет реализовать четырехстороннее облучение по многопроходной системе.

Известно, что выпущенный в атмосферу пучок элек-

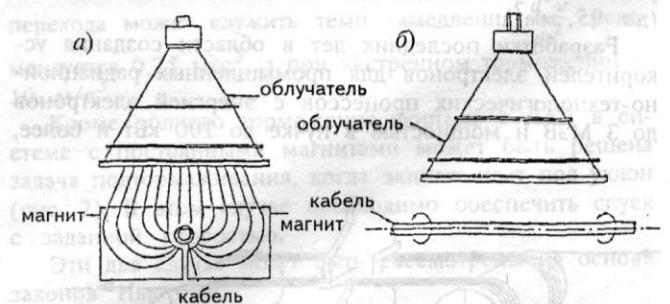


Рис. 4. Способы осуществления кругового облучения кабельных изделий: а — с помощью электромагнитной системы; б — вращением кабеля относительно его продольной оси в процессе перемотки

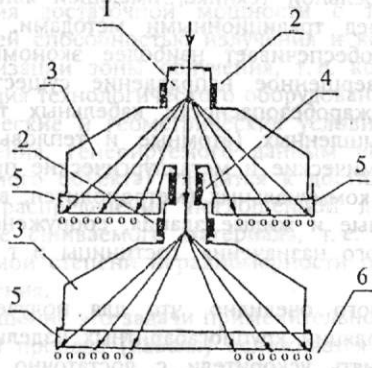


Рис. 5. Выпускное устройство к ускорителю типа ИЛУ с импульсным пучком электронов, последовательно переключаемым на каждое из четырех выпускных окон и выходящим под углом 45° к плоскости, заполненной перематываемым облучаемым кабелем: 1 — сканирующее устройство; 2 — сердечник магнита сканирующего устройства; 3 — вакуумная камера; 4 — фокусирующая линза; 5 — выпускные окна; 6 — облучаемый кабель

тронов генерирует в воздухе озон и окислы азота, причем концентрация их возрастает с увеличением мощности пучка электронов и пробега их в воздухе. Кроме того, из-за радиолитического разложения полимерной матрицы и ингредиентов, содержащихся в композиции (стабилизаторы, антипирены, функциональные добавки), образуются различные газообразные продукты, в том числе токсичные соединения. Обычно эти продукты с помощью вытяжной вентиляции сбрасывают в окружающую среду через достаточную высокую (десятки метров) трубу, с тем, чтобы благодаря естественному рассеянию снизить их концентрацию у поверхности земли.

Разработанная система газоочистки [8] абсорбционно-каталитического типа обеспечивает очистку вентиляционных выбросов от озона на 99,5%, а от сопутствующих примесей — на 95,5% и гарантирует их концентрацию менее 0,1 ПДК на поверхности земли в непосредственной близости от помещения радиационно-технологической установки даже при вентиляционном выбросе на уровне крыши, без применения высокой вытяжной трубы (рис. 7). Применение такой системы газоочистки гарантирует полную экологическую безопасность электронно-лучевой установки.

В предыдущие годы из используемого в кабельной технике арсенала методов сшивания полимерных материалов (перекисное, силанольное, радиационное) на долю электронно-лучевой обработки приходилась «ниша», заполненная, в основном, монтажными проводами, специальными кабелями, миниатюрными кабелями управления и силовыми кабелями небольших сечений (до 95 мм^2).

Разработки последних лет в области создания ускорителей электронов для промышленных радиационно-технологических процессов с энергией электронов до 3 МэВ и мощностью в пучке до 100 кВт и более,

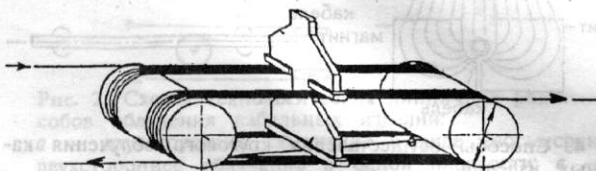


Рис. 6. Схема технологической линии для четырехстороннего облучения кабеля при многопроходной системе перематки

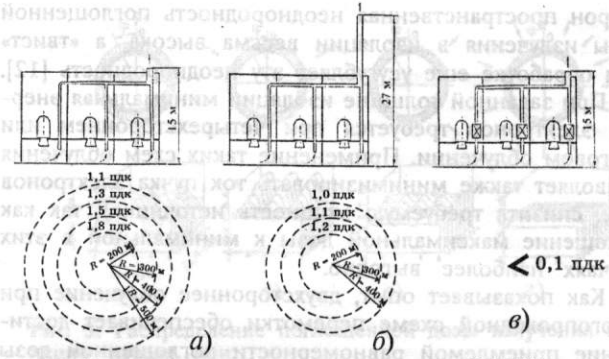


Рис. 7. Карта-схема расположения изолиний ПДК для радиационно-технологической установки с тремя ускорителями электронов мощностью 20 кВт каждый: а — выброс на уровне крыши без применения системы газоочистки; б — выброс через трубу высотой 27 м без применения системы газоочистки; в — выброс на уровне крыши с применением системы газоочистки

а также развитие новых технологических принципов электронно-лучевой обработки кабельных изделий открывают дополнительные перспективы для дальнейшего расширения масштабов этого прогрессивного научно-технического направления в будущем.

Список литературы

1. Финкель Э.Э., Сучков В.Ф. Ионизирующие излучения и кабельная техника. М.: ВНИИЭМ, 1966.
2. Финкель Э.Э., Лещенко С.С., Брагинский Р.П. Радиационная химия и кабельная техника. М.: Атомиздат, 1968.
3. Ускорители для промышленных радиационно-технологических процессов. ЭЛВ. ИЛУ. М.: Внешторгиздат, 1984.
4. Финкель Э.Э., Брагинский Р.П., Лещенко С.С. Стабилизация радиационно-модифицированных полиолефинов. М.: Химия, 1973.
5. Финкель Э.Э., Брагинский Р.П. Радиационное модифицирование полиолефинов // Радиационная химия полимеров. М.: Наука, 1973.
6. Технология радиационного модифицирования полимеров. М.: Энергоатомиздат, 1983.
7. Финкель Э.Э., Мещанов Г.И., Дикерман Д.Н. Радиационная технология в электроизоляционной и кабельной технике — состояние и перспективы // Journal of Industrial Irradiation Technology. 1984. Vol. 2. No 2. P. 155—182.
8. Повышение экологической безопасности процессов радиационного модифицирования кабельной изоляции / Е.И. Миронов, Э.Э. Финкель, Г.И. Мещанов и др. // Исследование и производство кабелей и проводов. М.: Энергоатомиздат. С. 115—122.
9. Финкель Э.Э., Брагинский Р.П. Нагревостойкие провода и кабели с радиационно-модифицированной изоляцией. М.: Энергия, 1983.
10. Кабели и провода для ядерных энергетических установок / Д.Н. Дикерман, Э.Э. Финкель, Г.И. Мещанов и др. М.: Энергоатомиздат, 1983.
11. Финкель Э.Э. Радиационная технология в кабельной технике. М.: Информэлектро, 1981.
12. Banerlin R., Bickel H.D. Irradiations Methods and Dose Uniformity in Radiation Cross-Linking of Cable and Wire Insulation // Radiation Physics and Chemistry. 1981. Vol. 18. No 5—6. P. 837—846.
13. Финкель Э.Э., Тимко Ю.Н., Тимошин Ю.М. Использование электромагнитных систем для повышения эффективности облучения протяженных изделий и улучшения равномерности поглощенной дозы излучения // Radiation Physics and Chemistry. 1983. Vol. 22. No 3—5. P. 387—390.
14. Электромагнитные системы для повышения эффективности процессов облучения изделий на ускорителях электронов / Э.Э. Финкель, Ю.Н. Тимко, Е.И. Миронов и др. // Тезисы докладов VI Всесоюзного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. Л.: НИИЭФА, 1988.
15. Повышение эффективности облучения электронным пучком цилиндрических объектов с помощью магнитных систем / Э.Э. Финкель, Р.А. Салимов, Ю.Н. Тимко и др. // Атомная энергия. 1982. Т. 53. Вып. 5. С. 317—319.
16. А.с. 1314389 СССР. Способ радиационной обработки протяженных изделий / В.Л. Ауслендер, Э.Э. Финкель, Г.И. Мещанов и др.