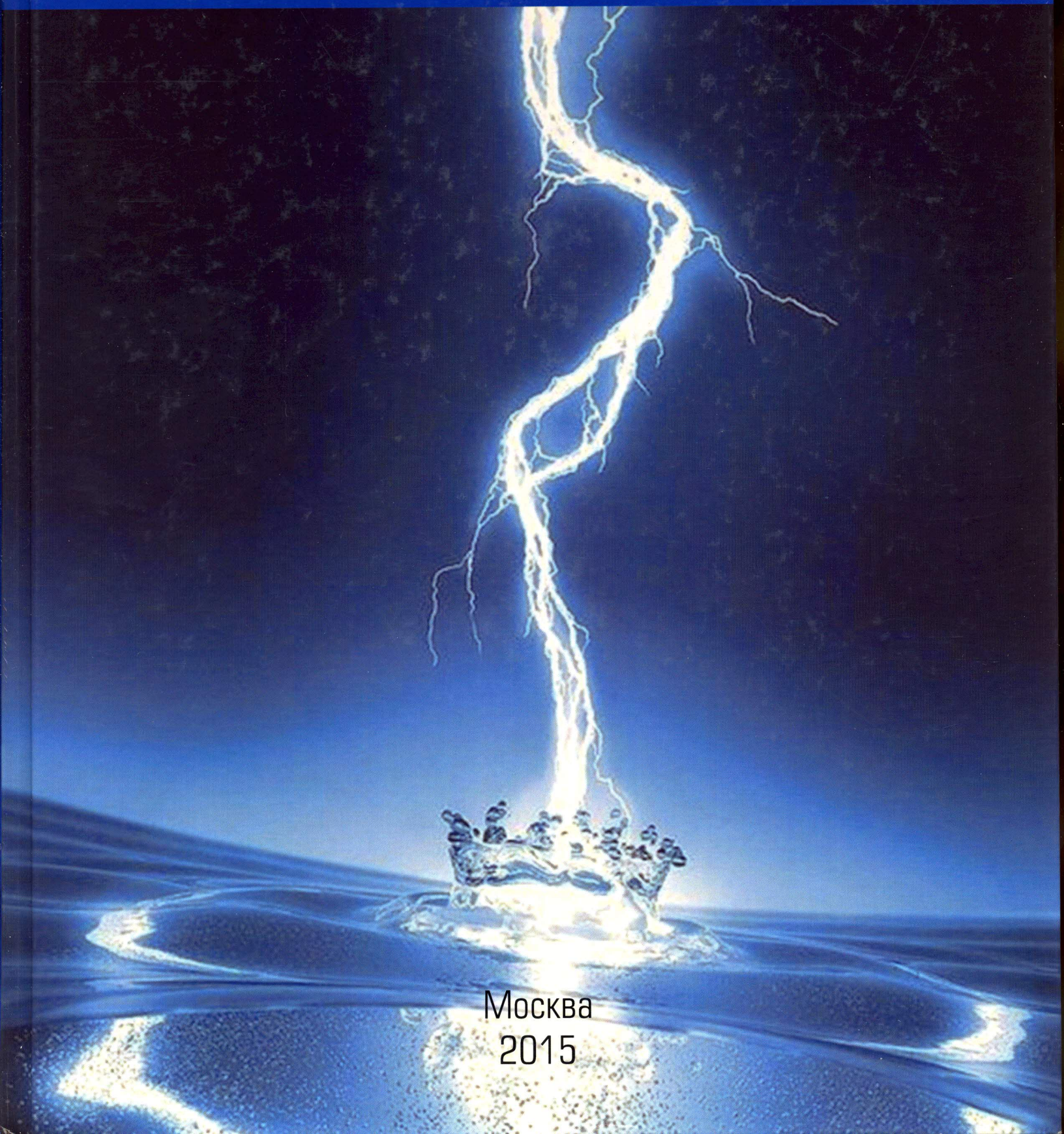


13  
А437

# Актуальные проблемы химии высоких энергий



Москва  
2015

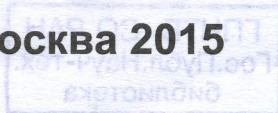


Экз. 28

# Актуальные проблемы химии высоких энергий

# Актуальные проблемы ХИМИИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Москва 2015



© Авторское право. 2015

Член-корреспондент РАН Ермаков Б.Г.

1-7-9691-797-1

ВЛР 544 54  
ВЕН 24.5



УДК 544.54  
ББК 24.5  
А437

**Сопредседатели конференции**

Ершов Б.Г.,  
член-корреспондент РАН ИФХЭ РАН  
Тарасова Н.П.,  
член-корреспондент РАН РХТУ

**Организационный комитет конференции (по алфавиту):**

Алдошин С.В.,  
академик Президиум РАН  
Алфимов М.В., академик ЦФ РАН  
Гильман А.Б. ИСПМ РАН  
Зезин А.А. ИСПМ РАН  
Калмыков С.Н. Химический факультет МГУ  
Кирюхин В.П. ИПХФ РАН  
Магомедбеков Э.П. РХТУ  
Макаров И.Е. ИФХЭ РАН  
Мельников М.Я. Химический факультет МГУ

Молин А.А. ТП «Радиационные технологии»  
Молин Ю.Н., академик ИКГ СО РАН  
Мясоедов Б.Ф., академик ИФХЭ РАН  
Пономарев А.В. ИФХЭ РАН  
Путилов А.В. НИЯУ МИФИ  
Сазонов А.Б. РХТУ  
Сапрыкин О.А. ЦНИИМАШ  
Смирнов В.П., академик ГК «Росатом»  
Разумов В.Ф., член-корреспондент РАН ИПХФ РАН  
Фельдман В.И. Химический факультет МГУ  
Цивадзе А. Ю., академик ИФХЭ РАН  
**Ученые секретари конференции:**  
к.х.н. Занин А.А. РХТУ  
к.х.н. Раздрокина С.П. ИФХЭ РАН

**А437 VI Российская конференция (с приглашением специалистов стран СНГ) «Актуальные проблемы химии высоких энергий»: г. Москва, 20–22 октября 2015 г. — М.: Издательство «Граница», 2015. — 368 с., ил.**

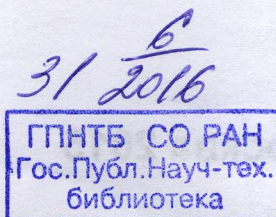
**ISBN 978-5-94691-797-1**

Сборник включает краткое содержание докладов (под общей редакцией члена-корреспондента РАН Ершова Б.Г.) участников VI Российской конференции (с приглашением специалистов стран СНГ) «Актуальные проблемы химии высоких энергий», состоявшейся 20–22 октября 2015 года в Российском химико-технологическом университете им. Д.И. Менделеева (Миусская площадь, 9, Москва, РХТУ им. Д.И. Менделеева). Конференция организована Российской академией наук, Научным советом РАН по физической химии, Институтом физической химии и электрохимии им. А.Н.Фрумкина РАН, Российским химико-технологическим университетом имени Д.И. Менделеева, Московским государственным университетом имени М. В. Ломоносова и Технологической платформой «Радиационные Технологии».

Сборник предназначен для специалистов в области химии высоких энергий.

УДК 544.54  
ББК 24.5

ISBN 978-5-94691-797-1



© Авторы докладов, 2015



VI Российская конференция (с приглашением специалистов стран СНГ) «Актуальные проблемы химии высоких энергий» по своей тематике охватывает практически весь спектр исследований химических и физико-химических процессов, протекающих в веществе и материалах под воздействием нетепловой энергии. В том или ином охвате обсуждаются эффекты, вызванные действием ионизирующего излучения, света различного диапазона, электрических разрядов, плазмы, ультразвука и других высокоэнергетических факторов. Первостепенное внимание уделено изучению механизмов и кинетики реакций с участием ионов, радикалов и возбужденных частиц, установлению их природы и свойств, измерению констант скоростей реакций с их участием, а также обсуждению роли радиации в развитии важных природных явлений.

Фактором, по-прежнему, оказывающим значительное стимулирующее влияние на развитие одного из основных разделов химии высоких энергий – радиационную химию, является расширяющийся вклад АЭС в общую энергетику. Поэтому остается актуальным экспериментальное и теоретическое изучение состояния теплоносителя (воды и новых веществ), коррозионных процессов, стойкости используемых материалов, а также решение многочисленных проблем с переработкой использованного ядерного топлива и утилизацией радиоактивных отходов. Также в последние десятилетия постоянно расширяется использование радиационных технологий в промышленности, медицине и сельском хозяйстве. Согласно данным Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), стоимость продукции радиационных и изотопных технологий уже становится сопоставимой со стоимостью энергии, производимой АЭС. Здесь следует указать на то, что преимущественное использование в качестве источника ионизирующего излучения получили ускорители электронов. Поэтому на конференции мы уделяем большее внимание проблеме создания установок современного типа в нашей стране.

Поступательно развиваются и многие другие направления химии высоких энергий, связанные, в частности, с изучением действия УФ-света, плазмы и электрических разрядов на вещества в различных состояниях. Здесь важно отметить, что экспериментально-теоретические исследования успешно сочетаются с работой по использованию полученных результатов в практических целях.

В текущем году исполняется 120 лет со дня рождения одного из основоположников радиационной химии – профессора Натальи Алексеевны Бах, которая впервые начала системные исследования радиационно-химических превращений веществ в нашей стране и сформировала научную школу, продолжающую свое успешное развитие. Также исполняется 85 лет члену-корреспонденту РАН Алексею Константиновичу Пикаеву и профессору Ленару Тимофеевичу Бугаенко, 80 лет профессору Игорю Мстиславовичу Баркалову. Все они внесли неопределимый вклад в становление химии высоких энергий и мы бережно храним память о них.

С участием ведущих ученых и специалистов нашей страны в химии высоких энергий на конференции обсуждены фундаментальные проблемы развития этой важной области науки, тенденции формирования инновационных направлений химической технологии, а также практические вопросы создания современных ускорителей электронов и других аппаратов. Материалы конференции, можно надеяться, будут интересны и полезны научным сотрудникам, работающим в области химии высоких энергий, химической технологии, экологии и охраны окружающей среды, а также инженерно-техническим специалистам, связанным с эксплуатацией ускорителей электронов и других источников нетепловой энергии.

**Член-корреспондент РАН Ершов Б.Г.**



# **АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ХИМИИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

**VI Российская конференция  
(с приглашением специалистов стран СНГ)**

*Компьютерная верстка: Ермолаев В.М., Раздрокина С.П.*

**Формат 60x84/8. Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Тираж 250 экз.  
Заказ № 845.**

**ООО «Издательская группа «Граница»  
123007 Москва, Хорошевское шоссе, 38  
Тел.: (495) 941-26-66, 941-27-49.  
Факс: (495) 941-36-46.  
E-mail: granica\_publish@mail.ru  
<http://granicagroup.ru>**



## ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ДЛЯ РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Куксанов Н.К., Салимов Р.А., Фадеев С.Н., Немытов П.И., Когут Д.А., Корчагин А.И.,  
Лаврухин А.В., Семенов А.В., Черепков В.Г., Домаров Е.В., Воробьев Д.С.,  
Голковский М.Г., Голубенко Ю.И.

*ИЯФ СО РАН, пр-т Лаврентьева 11, Новосибирск, Россия, e-mail: dkogut@mail.ru*

Современная промышленность широко использует технологические процессы с использованием пучков электронов для радиационной модификации полимеров, стимулирования или инициирования химических реакций, очистки газов (дыма) и сточных вод, дезинфекции зерна и так далее. Электронно-лучевые технологии широко используются в промышленности для радиационной сшивки полимерных композиций кабельной изоляции. Использование этих технологий позволило освоить производство широкого ассортимента термостойких и радиационно-стойких проводов, кабелей, термоусаживаемых изделий. Все они обладают повышенной надежностью при монтаже и эксплуатации, как в обычных, так и в экстремальных условиях.

Наиболее совершенным инструментом для радиационной обработки являются мощные промышленные ускорители электронов. Процесс радиационной обработки требует применения дорогостоящего оборудования, поэтому задача повышения эффективности его использования является достаточно актуальной. Оптимизируя способ облучения изделий электронным пучком, можно существенно поднять качество облучения и эффективность использования пучка.

Институт ядерной физики Сибирского отделения Российской академии наук является одним из мировых лидеров в области разработки, проектирования, производства и поставки в промышленность электронных ускорителей. Ускорители электронов типа ЭЛВ являются машинами постоянного тока, предназначенными для широкого применения в различных технологических процессах. Благодаря совершенной системе управления эти ускорители легко интегрируются в любой технологический процесс. Ускорители типа ЭЛВ разработаны с использованием унифицированных узлов и систем, что позволяет легко адаптировать их к специфическим требованиям потребителя по основным параметрам: диапазон рабочих энергий, мощность пучка ускоренных электронов, размер выпускного окна и т.д. Имеется широкий набор дополнительных устройств, расширяющий возможные применения ускорителей. Конструктивные и схемные решения обеспечивают непрерывный круглосуточный режим работы в условиях промышленного производства. Специфическими чертами ускорителей ЭЛВ являются конструктивная простота, удобство управления, надежность в эксплуатации. ИЯФ предлагает серию ускорителей электронов типа ЭЛВ перекрывающих энергетический диапазон от 0,25 до 2,5 МэВ, с максимальным током пучка ускоренных электронов до 100 мА и максимальной мощностью выведенного пучка до 100 кВт для обычных машин и 500 мА и 400 кВт для ускорителей природоохранного назначения[1].

Ускорители серии ЭЛВ – наиболее массовый тип отечественных российских ускорителей, нашедший практическое применение во многих областях радиационной химии, а также благодаря созданию системы выпуска в атмосферу мощного сфокусированного электронного пучка, давшей толчок развитию радиационно-термических технологий. Ускорители ЭЛВ хорошо известны во всем мире. К настоящему времени более 140 ускорителей поставлено от Германии на западе до Филиппин и Малайзии на востоке. Можно формализовать ускорители по параметрам, как, например, приведено в таблице 1. Практически же ускорители могут быть изготовлены в соответствии с любыми специфическими требованиями пользователя.



Таблица 1. Основные параметры ускорителей серии ЭЛВ

	Диапазон энергий, МэВ	Мощность в пучке, кВт	Максимальный ток пучка, мА
ЭЛВ-мини	0.2-0.4	20	50
ЭЛВ-0.5	0.4-0.7	25	40
ЭЛВ-1	0.4-0.8	25	40
ЭЛВ-2	0.8-1.5	20	25
ЭЛВ-3	0.5-0.7	50	100
ЭЛВ-4-1	0.5-1.0	100	100
ЭЛВ-4-1.5	1.0-1.5	100	66
ЭЛВ-6	0.8-1.2	100	80
ЭЛВ-6М	0.7-0.9	160	200
ЭЛВ-8	1.0-2.5	100	50
ЭЛВ-12	0.5-0.9	400	500

Общий вид ускорителя ЭЛВ приведен на рис. 1. При одинаковом диаметре основания сосуда, высота его зависит от максимальной энергии ускоренных электронов.

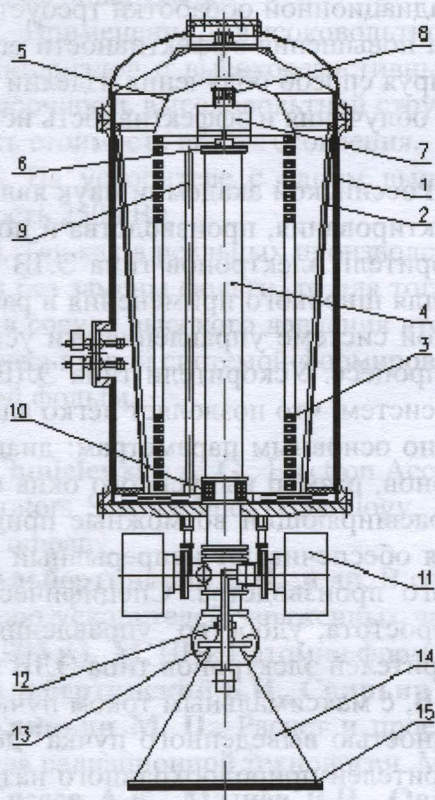


Рис.1. Общий вид ускорителя ЭЛВ.

1 – сосуд, 2 – первичная обмотка, 3 – выпрямительные секции, 4 – ускорительная трубка, 5 – высоковольтный электрод, 6 – инжектор, 7 – блок управления инжектором, 8 – оптическая система управления током пучка, 9 – делитель энергии, 10 – магнитная линза, 11 – вакуумные насосы, 12, 13 – электромагниты сканирования, 14 – выпускное устройство; 15 – фольга выпускного окна ускорителя.

Источником высокого напряжения в ускорителях ЭЛВ является каскадный генератор с параллельной индуктивной связью [2]. Колонна секций высоковольтного выпрямителя расположена внутри первичной обмотки. Каждая выпрямительная секция состоит из катушки вторичной обмотки и схемы выпрямления напряжения. Выпрямительные секции соединяются либо последовательно, либо последовательно-параллельно. Заканчивается колонна высоковольтным электродом, в нем находится блок управления инжектором. Ускорительная трубка расположена внутри колонны выпрямительных секций. Все указанные элементы конструкции размещены внутри сосуда высокого давления, заполненного элегазом. В силу этого обстоятельства ускорители ЭЛВ наиболее компактны среди машин своего класса. Компоненты вакуумной системы и выпускное устройство крепятся к днищу сосуда. Электроны, эмитированные катодом, расположенным на верхнем конце ускорительной трубки, приобретают на ее выходе полную энергию  $eU_0$ . Электромагнитами сканирования электронный пучок равномерно распределяется по фольге выпускного окна и выводится в атмосферу. Пучок сканируется в двух направлениях: вдоль и поперек фольги. Обработываемый материал движется под выпускным окном ускорителя. В отличие от других ускорителей специальная электроника позволяет непрерывно контролировать положение раstra пучка.



Для ускорителей разработано следующее дополнительное оборудование [3]:

*Система кольцевого и двухстороннего облучения.* Система кольцевого облучения предназначена для облучения изоляции проводов большого диаметра (до 50 мм) и толстостенных термоусаживаемых труб. Использование этой системы позволяет получить равномерное по азимуту облучение изоляции за один проход провода под пучком. Схематически система кольцевого облучения показана на Рис. 2.

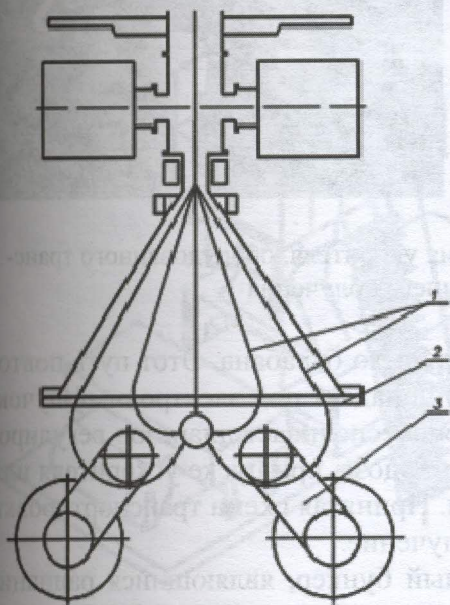


Рис. 2

ная поверхность провода меняются местами. Электронный пучок выводится под углами  $\pm 45^\circ$  к вертикали, траектории пучков перекрещены под углом  $90^\circ$ , поэтому, учитывая смену поверхностей, в итоге получается четырехстороннее облучение изделия. Принцип работы устройства основан на отклонении электронного пучка магнитным полем. Выходящий из ускорителя электронный пучок сканируется в плоскости рисунка электромагнитами развертки 2. Далее он попадает в постоянное поле электромагнитов 4. Это поле изменяет траектории электронов так, что, независимо от места входа, на выходе все электроны, проходящие левый магнит, имеют угол с вертикальной осью  $-45^\circ \pm 5^\circ$ , а правый, соответственно,  $45^\circ \pm 5^\circ$ .

*Транспортные устройства.* Совместно с ускорителем ЭЛВ могут поставляться транспортные устройства для перематки провода, термоусаживаемой трубки или ленты под пучком. На Рис. 4 показана конструкция устройства для транспортировки провода или трубки. Устройство содержит ведущий барабан 7, ведомый барабан 2, направляющие валы 4, сепараторы 5. Все устройство собрано на станине 3. Ведущий барабан приводится во вращение электродвигателем 11. Облучаемая трубка или провод поступает на ведущий барабан сверху, проходит через сепараторы на низ

На рисунке цифрой 1 обозначены траектории электронов, которые, выйдя из выпускного окна ускорителя 2, попадают в поле электромагнитов 3 с полюсными наконечниками, обеспечивающими поворот траекторий электронов в воздухе, как показано на рисунке. Изменение формы полюсных наконечников на более протяженные в направлении вдоль выпускного устройства, позволяет получить систему двухстороннего облучения. Система двухсторонняя предназначена для облучения более тонких (до 10 мм наружный диаметр) проводов при многократном прохождении провода под пучком и обеспечивает двухстороннее облучение провода (сверху и снизу) при ширине раскладки до 60 см.

*Система 4-стороннего облучения.* Для повышения однородности облучения изоляции проводов применяют способ 4-х стороннего облучения (Рис.3). Раскладка провода под пучком выполнена таким образом, что на каждом витке верхняя и ниж-

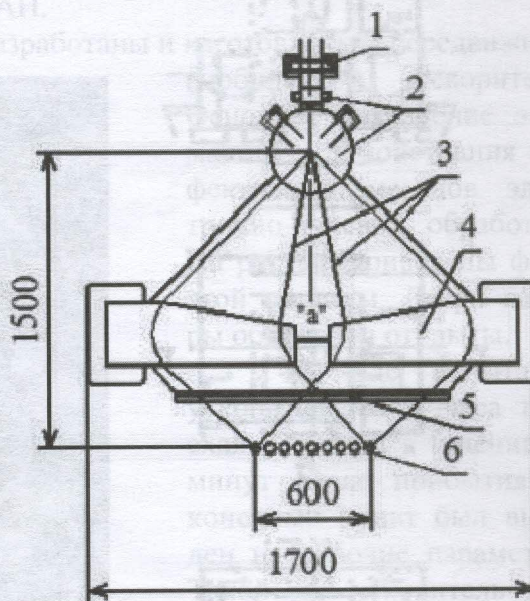


Рис.3



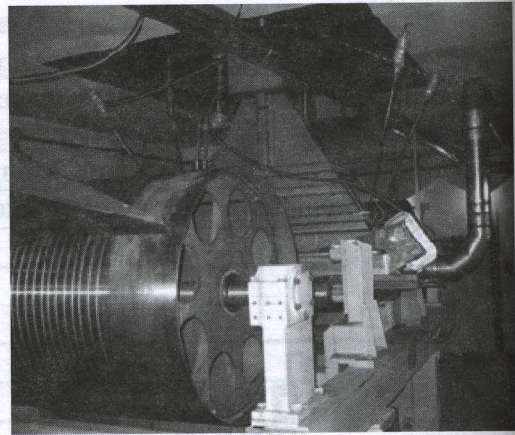
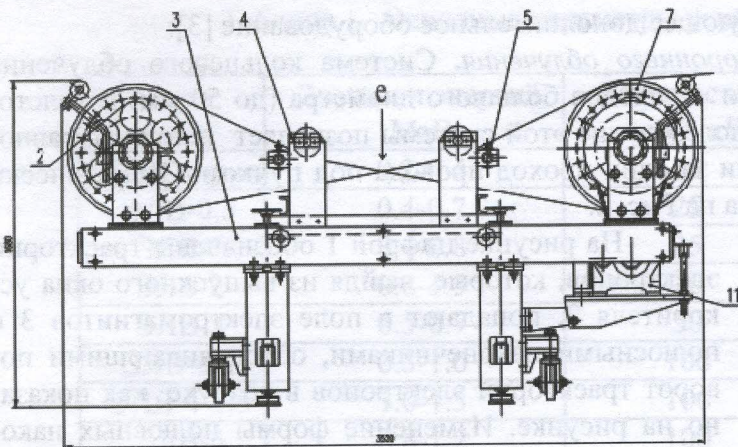


Рис.4 Чертеж транспортного устройства и вид камеры облучения ускорителя, оборудованного транспортным устройством и системой 4-стороннего облучения

ведомого барабана, огибает его и возвращается на низ ведущего барабана. Этот путь повторяется многократно. В месте перекрестия провод (трубка) попадает под электронный пучок. Асинхронный двигатель совместно с системой управления обеспечивает диапазон регулирования скорости до  $10^3$ , что позволяет соблюдать постоянство дозы при пуске ускорителя или его останове при любых случайных отключениях системы. Принятая схема транспортировки (повернутая "восьмерка") обеспечивает двухстороннее облучение.

Для размещения ускорителей необходим специальный бункер, являющийся радиационной защитой. Для ускорителей с энергией выше 0.7 МэВ бункер, как правило, является бетонным. Существует несколько версий, определяемых типом используемого ускорителя. ЭЛВ в своем классе энергий и мощностей имеют минимальные размеры, т.е. сокращаются затраты на строительство. На рис. 5 приведен вариант размещения ускорителя ЭЛВ-4 с наземным расположением камеры облучения. Ввод и вывод обрабатываемой продукции расположены с противоположных сторон бункера. Довольно часто используется вариант, когда они расположены с одной стороны. Бункер оборудован откатной стальной защитной дверью.

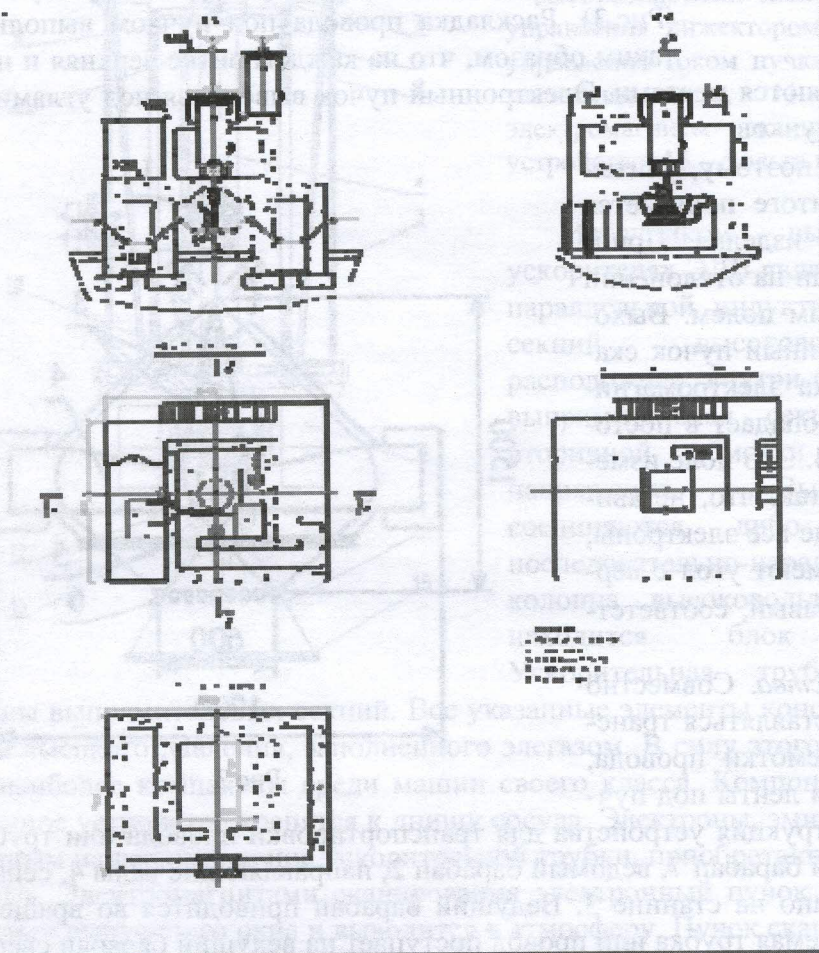


Рис.5 Размещение ускорителя с наземной камерой облучения

Для размещения ускорителей необходим специальный бункер, являющийся радиационной защитой. Для ускорителей с энергией выше 0.7 МэВ бункер, как правило, является бетонным. Существует несколько версий, определяемых типом используемого ускорителя. ЭЛВ в своем классе энергий и мощностей имеют минимальные размеры, т.е. сокращаются затраты на строительство. На рис. 5 приведен вариант размещения ускорителя ЭЛВ-4 с наземным расположением камеры облучения. Ввод и вывод обрабатываемой продукции расположены с противоположных сторон бункера. Довольно часто используется вариант, когда они расположены с одной стороны. Бункер оборудован откатной стальной защитной дверью.



Существует вариант с подземным расположением камеры облучения. В этом случае защитная дверь не требуется, а вход в камеру облучения осуществляется через лабиринт, снижается высота крюка подъемного механизма, уменьшается количество бетона.

Ускорители с энергией ниже 0.7 МэВ могут располагаться в локальной радиационной защите. Как правило, она изготавливается из стали с добавлением в отдельных местах свинца. рисунке приведен ускоритель на энергию 0.5 МэВ и ток 100 мА в локальной защите.

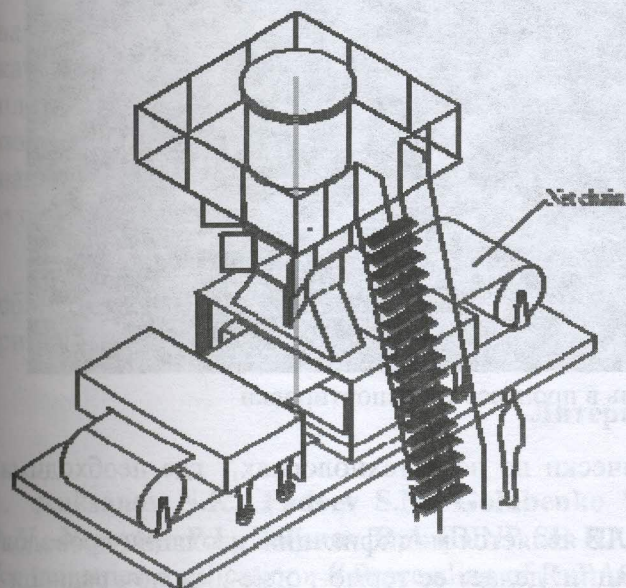


Рис.6 Схематический чертеж и вид ускорителя 0.5 МэВ\*100 мА в локальной защите

На рис. 6 (справа) приведено фото модернизированного ускорителя 0.8 МэВ\*40 мА, установленного на Ижевском заводе пластмасс. Ускоритель был изготовлен НИИЭФА им. Ефремова и впоследствии модернизирован ИЯФ СО РАН.

Совместно с Южно-корейской фирмой были разработаны и изготовлены 2 передвижных

(мобильных) ускорителя. Основное назначение этих машин – демонстрация эффективных методов электронно-лучевой обработки. На рис.7-8 приведены фото этой машины. Двери камеры облучения открыты.

В ходе испытаний ускоритель за 4 часа проехал 135 км и в течение 15 минут после прибытия на конечный пункт был выведен на рабочие параметры. Такой же ускоритель был транспортирован в Саудовскую Аравию и после проведения экспериментов возвращен в Южную Корею.



Рис.7. Камера облучения передвижного ускорителя





Рис.8. Передвижной ускоритель в процессе транспортировки

Ускорители ELV используются практически во всех технологиях, где необходима энергия электронного луча:

Основным применением ускорителей ЭЛВ является модификация изоляции проводов и кабелей. Облучение изменяет свойства изоляции: делает ее термо-, огне-, масло-, радиационно-стойкой по отдельности или комбинированно к перечисленным агентам. На ускорителях ЭЛВ обрабатываются провода сечением от 0.1 до 120 кв.мм. Производительность (в зависимости от размеров провода и состава композиции) может достигать 500 м/мин. Система 4-стороннего облучения улучшает качество обработки, в частности - однородность распределения поглощенной дозы по азимуту. При фиксированной неоднородности возможно уменьшение энергии необходимой для облучения, т.е. повышения эффективности. Применение системы 4-стороннего облучения особенно эффективно для обработки проводов большого диаметра со значительной толщиной изоляции.

Еще одним выгодным применением ускорителей ЭЛВ является производство термоусаживаемых изделий: трубы, мерные куски, муфты, ленты и пленки. Производительность может достигать 1000 кг в час. Как правило, ускорители для обработки кабеля и термоусаживаемых изделий работают круглосуточно.

Производство искусственной кож и защитных покрытий. Это означает полимеризацию электронным пучком для производства кожеподобных материалов с тепло-, огне-, масло-, хладо и т.д. стойкостью. Радиационно-химическая технология позволяет получать материал для укрытий, спецодежды, обуви и сумок.

Производство самоклеящихся полос и резино-технических изделий. Композитный материал для мягкой кровли. Предназначен для изготовления крыш жилых, общественных и промышленных зданий и сооружений. Он формируется из резиновой смеси на основе каучуков общего применения с последующим вулканизацией электронным пучком.

Отдельные ускорители используются для производства геля и пререгов, использующих углеродные волокна и полимерные связующие.

Отверждение лакокрасочных покрытий для стройиндустрии. Имело широкое применение, в настоящее время не используется.

Дезинсекция зерна. Проводилась в Одессе 2-мя по 20 кВт ускорителями с производительностью 200 т/час каждый. В Китае работает установка с 2-мя ускорителями ЭЛВ-8, мощностью 100 кВт каждый. Производительность каждой установки составляет 1000 Т/час



Электронно-лучевая обработка сточных вод. В России такая установка с двумя ускорителями мощностью 40 кВт работала в г. Воронеже для очистки загрязненных подземных вод. В настоящее время ее работа прекращена, поскольку водоносные горизонты очищены. Пилотная установка для очистки стоков красильного производства с ускорителем ЭЛВ-12, мощностью выведенного пучка которого составляет 400 кВт запущена в Южной Корее.

Ускорители ЭЛВ могут быть оборудованы системой вывода в атмосферу сфокусированного электронного пучка. Это позволяет использовать ускоритель в совершенно ином качестве. Электронный пучок используется как тепловой источник с высокой удельной плотностью мощности. Он может использоваться для испарения любых материалов с целью получения нанопорошков, производства катализатора для синтеза аммиака, поверхностной наплавки и закалки металлов, плавки и резки металлов, производства специальных керамик, и пр. Однако в промышленности это устройство не используется.

В ИЯФ имеется стенд с ускорителем ЭЛВ для проведения исследований в области области радиационных технологий. Потенциальные клиенты могут проводить на нем эксперименты по отладке технологии.

### Литература

1. **Kuksanov N.K., Fadeev S.N., Golubenko Y.I., Kogut D.A., Korchagin A.I., Lavrukhin A.V., Nemytov P.I., Salimov R.A** (BINP SB RAS, Novosibirsk) «High Power ELV Accelerators for Industries Application» // Proceeding of RuPAC-2010, Protvino, Russia, 2010
2. **Вейс М.Э., Куксанов Н.К., Долгополов В.Е., Лаврухин А.В., Салимов Р.А., Немытов П.И.** и др. «Усовершенствованный промышленный ускоритель электронов для облучения кабельной изоляции», //Кабели и провода, № 4 (287), М., 2004, с.16-19.
3. **Фадеев С.Н., Салимов Р.А., Немытов П.И.** и др. «Подпучковое оборудование для расширения технологических возможностей ускорителей ЭЛВ», //Сборник докладов X Международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 1-4 октября, 2001. С. 68. См. также Вестник "Радтех - Евразия", Новосибирск, 2002. С. 8-13.