

Г5
А437

Актуальные проблемы химии высоких энергий



Москва
2015

Экз. 28

Актуальные проблемы химии высоких энергий

УДК 544.54
ББК 24.2

Актуальные проблемы химии высоких энергий

Актуальные проблемы ХИМИИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

В настоящем году исполняется 120 лет со дня рождения одного из основателей современной химии — профессора Натальи Александровны Бах, которая впервые начала заниматься исследованием химических процессов, протекающих в нашей стране и за рубежом в области химии высоких энергий. В настоящее время в нашей стране и за рубежом активно ведутся исследования в области химии высоких энергий. В настоящее время в нашей стране и за рубежом активно ведутся исследования в области химии высоких энергий.

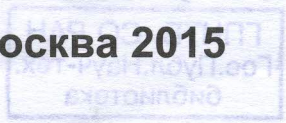
В настоящее время в нашей стране и за рубежом активно ведутся исследования в области химии высоких энергий. В настоящее время в нашей стране и за рубежом активно ведутся исследования в области химии высоких энергий.

В настоящее время в нашей стране и за рубежом активно ведутся исследования в области химии высоких энергий. В настоящее время в нашей стране и за рубежом активно ведутся исследования в области химии высоких энергий.

© Авторская коллекция, 2015

Член-корреспондент РАН Ершов Б.Г.

Москва 2015



ISBN 978-5-99691-737-1

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 ГЖ «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 специа-
листов стран СНГ) «Актуальные проблемы химии высоких
энергий»: г. Москва, 20–22 октября 2015 г. — М.: Издатель-
ство «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

31 ⁶ 2016
ГПНТБ СО РАН
Гос.Публ.Науч.-тех.
библиотека

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 неоценимый 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>

ИМПУЛЬСНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ ИЛУ – СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

**Безуглов В.В., Брызгин А.А., Власов А.Ю., Воронин Л.А., Горбунов В.А., Кокин Е.Н.,
Коробейников М.В., Лукин А.Н., Нехаев В.Е., Максимов С.А., Панфилов А.Д.,
Радченко В.М., Штарклев Е.А., Сидоров А.В., Ткаченко В.О., Факторович Б.Л.**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской Академии наук (ИЯФ СО РАН,
Россия, г. Новосибирск, e-mail: mkor@inp.nsk.su*

В Институте ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН разрабатываются и производятся промышленные импульсные линейные ускорители электронов типа ИЛУ.

Ускорители этого типа являются достаточно специфическими линейными высокочастотными ускорителями – это однорезонаторные машины, работающие в режиме стоячей полуволны (в отличие от большинства линейных ускорителей). Рабочие частоты ускорителей ИЛУ находятся в метровом диапазоне радиоволн – 118 МГц и 178 МГц. Длина ускоряющего промежутка ускорителя ИЛУ-8 – 3,6 см, у ИЛУ-10 – 26 см. Ускоряющий зазор у этих машин короче длины волны в вакууме, поэтому в процессе ускорения электроны приобретают энергию, практически равную максимальному напряжению на резонаторе. В ускорителях ИЛУ используется триодная электронная пушка (имеющая управляющий электрод), расположенная непосредственно перед ускоряющим зазором. Использование управляющего напряжения на электронной пушке позволяет оперативно регулировать ток пучка и уменьшить фазовый угол инжекции, что существенно снижает разброс энергии электронов в пучке.

Мощность пучка определяется мощностью ВЧ генераторов, питающих резонатор. Ускорители ИЛУ имеют рекордно высокую для линейных ускорителей эффективность преобразования ВЧ мощности в мощность пучка – от 50 % до 70 % в зависимости от энергии и мощности пучка.

Низкая (для ВЧ ускорителей) рабочая частота позволяет сделать ВЧ генераторы на мощных ламповых триодах ГИ-50, которые выпускаются промышленностью. Эти триоды стоят гораздо дешевле магнетронов и клистронов, которые используются для ВЧ питания большинства мощных ВЧ ускорителей. Импульсная мощность одного каскада на этих триодах достигает 2,5-3 МВт.

Основные параметры ускорителей ИЛУ

Ускорители типа ИЛУ предназначены для работы в диапазоне энергий 0,7-5 МэВ при мощности пучка ускоренных электронов до 50 кВт. Их отличительными особенностями являются простота конструкции, удобство эксплуатации и надежность при длительной работе в условиях промышленного производства. Основные параметры производимых Институтом ускорителей серии ИЛУ [1, 2, 4 и 5] приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Параметры ускорителей ИЛУ.

Ускоритель	Максимальная энергия электронов	Максимальная мощность пучка	Направление пучка
ИЛУ-8	1 МэВ	20 кВт	Вертикальное
ИЛУ-6	2.5 МэВ	20 кВт	Вертикальное
ИЛУ-10	5 МэВ	50 кВт	Вертикальное
ИЛУ-12	5 – 7.5 МэВ	60 кВт	Горизонтальное
ИЛУ-14	7.5 – 10 МэВ	100 кВт	Горизонтальное

Ускоритель ИЛУ-8

Ускоритель ИЛУ-8 с диапазоном энергии 0.7-1 МэВ и мощностью пучка до 20 кВт используется в основном для обработки тонких полимерных трубок, плёнок, проводов и кабелей.

Основное преимущество ИЛУ-8 – его небольшие габариты. Этот ускоритель с местной биологической защитой может быть установлен в любом цеху, имеющем достаточную высоту (не менее 4 м). При желании его можно разместить и в маленьком бетонном бункере. Ускоритель ИЛУ-8 в местной защите показан на Рисунке 1.

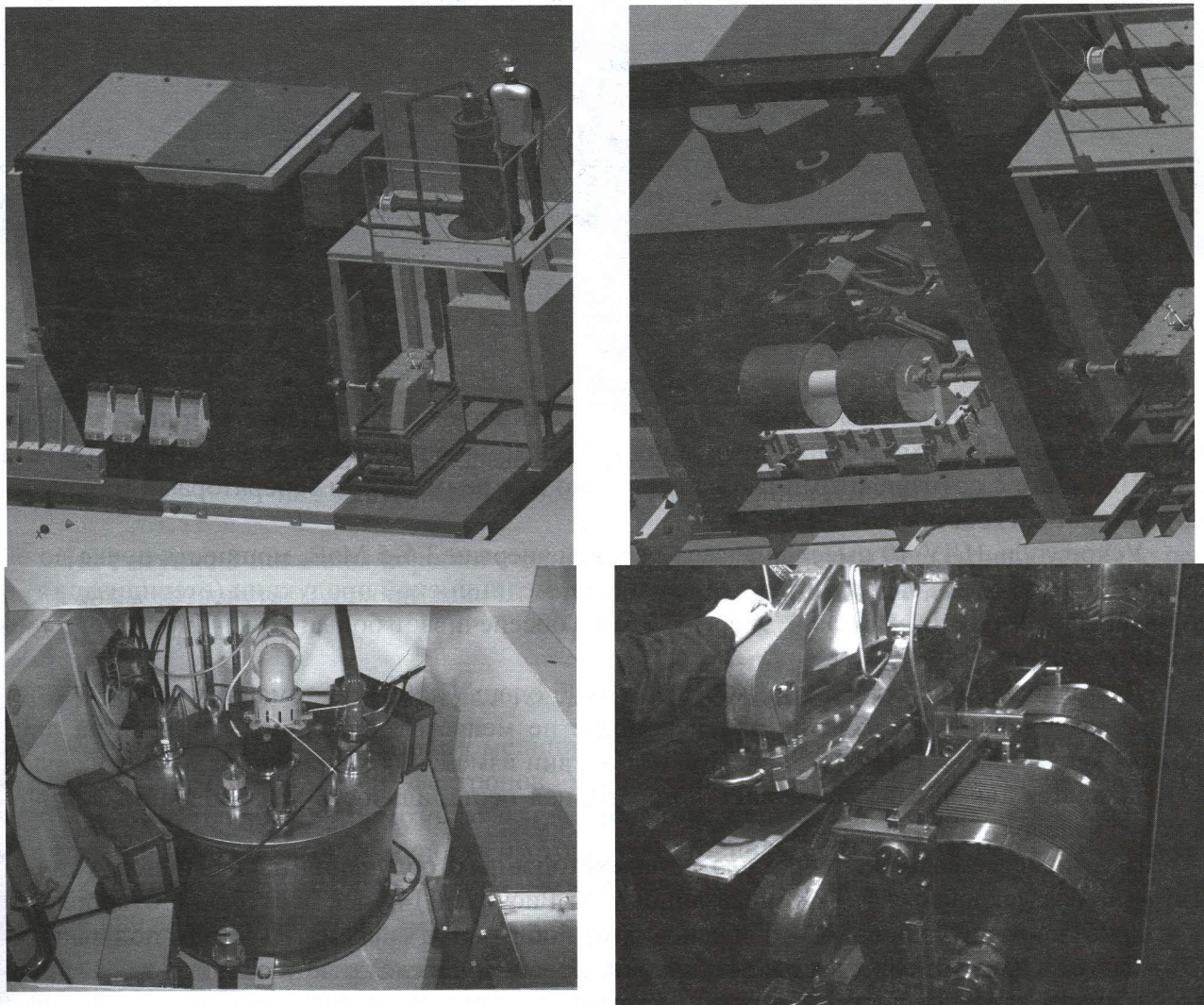


Рис. 1: Ускоритель ИЛУ-8 внутри местной защиты

В верхнем отделении стального короба местной защиты размещаются вакуумный бак ускорителя, волноводы обратной связи и ввода ВЧ мощности, вентилятор обдува выпускных окон и форвакуумная система. В нижнем отделении размещаются устройство выпуска пучка и перематывающее устройство (которое обеспечивает транспортировку длинномерных изделий под пучком). Устройство выпуска пучка для четырёхстороннего облучения, показанное на рисунке 1, обеспечивает поочерёдный выпуск пучка в атмосферу через 4 выпускных окна.

Лабиринты для ввода и вывода облучаемой длинномерной продукции (трубок, проводов, кабелей, иногда – плёнки) размещены в боковой стене защиты.

Для уменьшения габаритов конструкции ВЧ генератор выполнен в виде отдельной конструкции и размещён снаружи радиационной защиты. Связь ВЧ генератора с резонатором ускорителя осуществляется через 2 волновода.

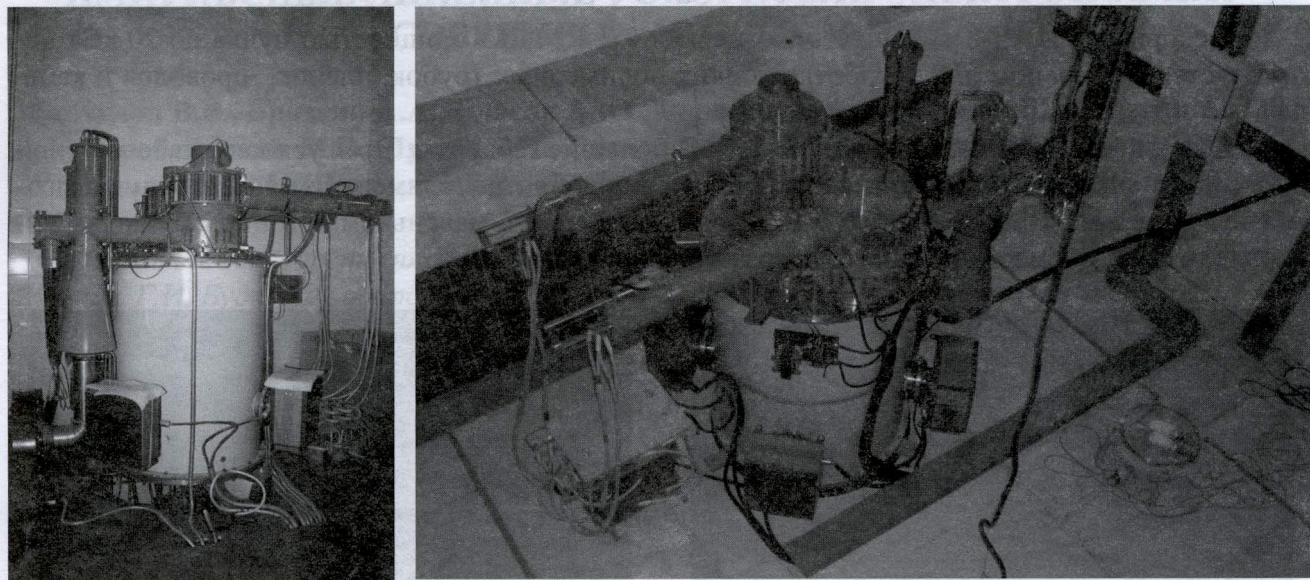


Рис. 2: Ускоритель ИЛУ-10

Ускоритель ИЛУ-10

На Рисунке 2 показаны ускорители ИЛУ-10, установленные в Парке ядерных технологий, г. Курчатов, Казахстан, и в Новосибирске на фармацевтическом производстве. Высота ИЛУ-10 вместе с размещёнными непосредственно над резонатором генераторами (покрашены в синий цвет) составляет 2,4 м.

Ускоритель ИЛУ-10 имеет диапазон рабочей энергии 3.5-5 МэВ, мощность пучка до 50 кВт. Эти ускорители используются для обработки медицинской продукции (стерилизации) и модификации изоляции кабелей. Энергия 5 МэВ обеспечивает большую глубину проникновения пучка.

Для радиационной обработки кабелей и труб очень удобна система облучения, в которой направления изгиба изделия при перематке не меняется, изделие облучается на двух уровнях как минимум с двух сторон. При отсутствии изменения направления изгиба изделий не развивается так называемый твист – продольная нестабильность угла поворота длинномерного изделия.

В устройстве выпуска пучка для четырехстороннего облучения (аналогичном устройству выпуска ускорителя ИЛУ-8 показанному на Рисунке 1) пучок электронов отклоняется на угол 45° на разных уровнях, что обеспечивает облучение перематываемого под выпускными окнами длинномерного изделия (трубки, провода, кабеля) с четырёх сторон. Эта система выпуска является достаточно универсальной и позволяет реализовать двух- или четырехстороннее облучение, или линейную развертку пучка простым переключением режима работы разворачивающих магнитов. Подпучковое перематывающее устройство (см. Рисунок 1) не меняет направление изгиба длинномерной продукции, поэтому твист не развивается и обеспечивается хорошая равномерность распределения дозы внутри продукции.

Для обработки медицинской продукции используется самое простое выпускное устройство – линейная развертка с одним окном.

Для ускорителя ИЛУ-10 разработаны и изготавливаются конвертеры для генерации тормозного излучения, рассчитанные на максимальную мощность электронного пучка 50 кВт. Использование тормозного излучения позволяет существенно увеличить глубину проникновения ионизирующего излучения и, соответственно, расширить спектр обрабатываемых изделий. Плата за это – снижение производительности обработки больше чем на порядок.

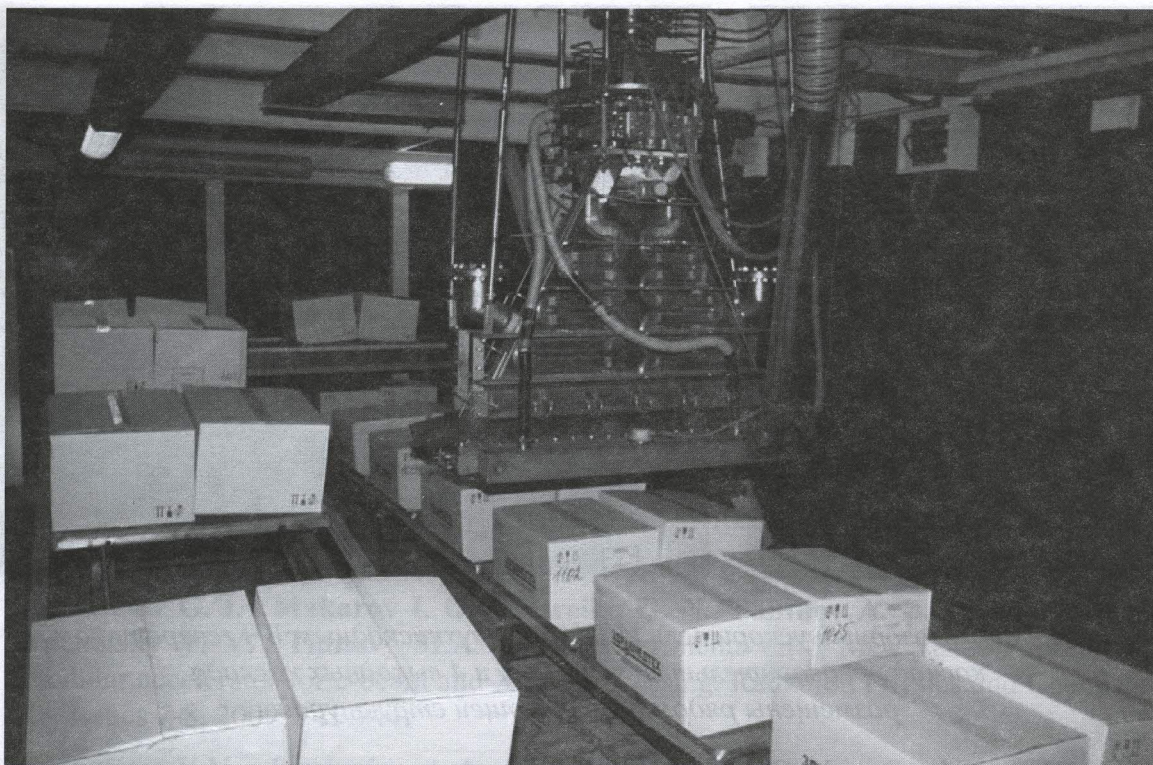


Рис. 3: Коробки с одноразовым медицинским бельём на конвейере под выпускным устройством ускорителя ИЛУ-10

На Рисунке 3 показаны коробки с одноразовым медицинским бельём на конвейере под выпускным устройством ускорителя ИЛУ-10 в облучательном центре на территории Института ядерной физики.

Многоазорные ускорители ИЛУ-12 и ИЛУ-14

Рост потребления одноразовых медицинских изделий вызвал потребность в росте энергии и мощности ускорителей электронов. Ускорители электронов с мощностью пучка 100 кВт в режиме генерации тормозного излучения могут успешно конкурировать с мощными изотопными источниками. Мощность изотопного источника 1 МКи примерно соответствует мощности электронного пучка 14 кВт. Ускорители ИЛУ-12 и ИЛУ-14 были разработаны специально для стерилизации.

Таблица 2. Производительность ускорителей при стерилизации электронным пучком

Энергия Электронов	5 МэВ – ИЛУ-10 5-7,5 МэВ – ИЛУ-12 10 МэВ – ИЛУ-14
Мощность Пучка	до 50 кВт – ИЛУ-10 до 60 кВт – ИЛУ-12 до 100 кВт – ИЛУ-14
Производительность при дозе 25 кГр	до 3,5 тонн/час – ИЛУ-10 до 4 тонн/час – ИЛУ-12 до 7 тонн/час – ИЛУ-14

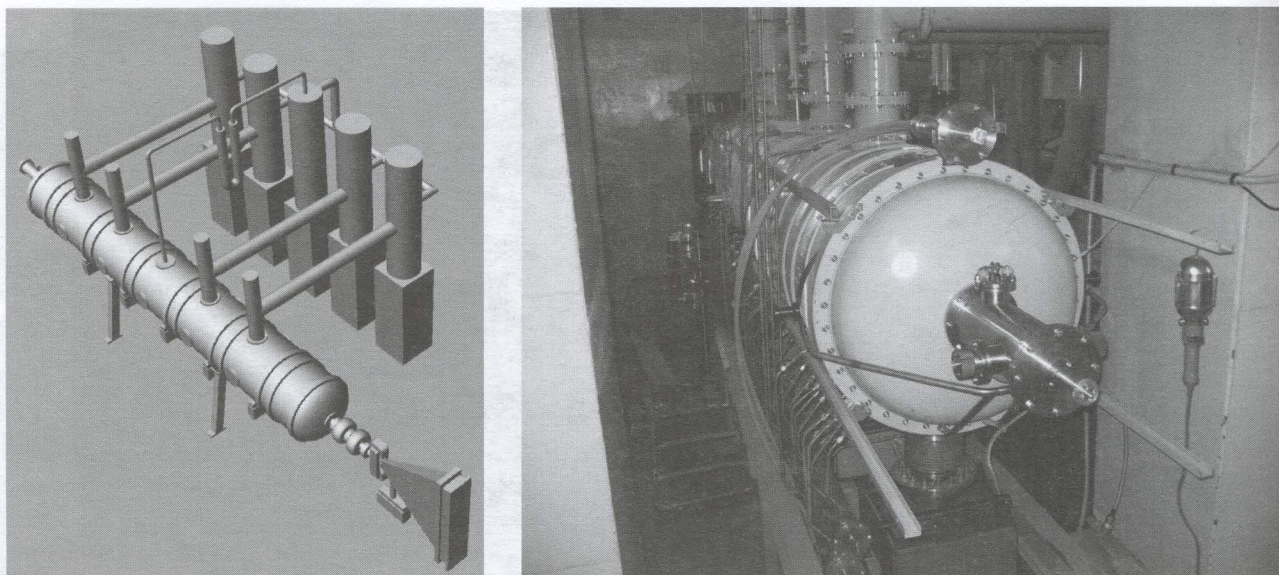


Рис. 4: Многозакорный ускоритель ИЛУ-14 с двухкаскадным ВЧ генератором, каскад предварительного усиления и 4 выходных каскада размещены рядом с ускоряющей структурой

Потери в однозакорной ускоряющей системе при энергии свыше 6 МэВ становятся неприемлемо высокими, поэтому новые ускорители снабдили многозакорной ускоряющей системой [3, 5]. Для повышения мощности пучка ВЧ генератор сделали двухкаскадным – первый каскад обеспечивает предварительное усиление сигнала обратной связи и питает 2 или 4 включенных в параллель и нагруженных на ускоряющую систему выходных каскада.

На Рисунке 4 показаны конструкция ускорителя ИЛУ-14 с ВЧ генератором и внешний вид ускорителя в бункере. Каскад предварительного усиления и 4 выходных каскада ВЧ генератора размещены рядом с ускорителем в соседнем помещении и связаны с ним через фидеры.

Как известно, предельная энергия электронов при стерилизации электронным пучком - 10 МэВ, а при генерации тормозного излучения - 7.5 МэВ.

Для генерации тормозного излучения был разработан конвертер с максимальной мощностью электронного пучка 100 кВт и диапазоном энергии 5-7,5 МэВ. В Таблице 3 приведены параметры конвертера.

Таблица 3. Параметры конвертера для генерации тормозного излучения.

Энергия	Толщина танталовой мишени	Эффективность конверсии в угол 60°	Эффективность конверсии в угол 360°
5 МэВ	0.7 мм	8.3 %	12 %
7,5 МэВ	0.9 мм	13.2 %	16.9 %

Ускорители для радиационных технологий продолжают развиваться. В начале 60-х годов XX века для облучения использовались ускорители с энергией 1 МэВ и мощностью несколько кВт [6], а сейчас в нашей стране выпускаются промышленные ускорители с энергией 10 МэВ и мощностью пучка до 100 кВт.

Мировой лидер компания ИВА выпускает ускорители типа Rhototron с энергией 10 МэВ и мощностью пучка 100 и 245 кВт. Максимальная мощность пучка – до 560 кВт – у ускорителя Rhototron ТТ1000 при энергии 7 МэВ [7]. Для ускорителей Rhototron выпускаются конвертеры для генерации тормозного излучения, рассчитанные на максимальные мощности пучка.

Ускорители Rhototron сложнее, чем ускорители ИЛУ, так как электронный пучок в них проходит по сложной траектории с поворотами. Стоимость ускорителей Rhototron существенно выше, чем стоимость ускорителей ИЛУ со сравнимыми параметрами.

Литература

1. Ауслендер В. Л., Безуглов В. В., Брызгин А. А. и др. Ускорители электронов серии ИЛУ и их использование в радиационно-технологических процессах // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Техническая физика и автоматизация. 2004. Вып. 58. С. 78–85.
2. Ауслендер В. Л., Безуглов В. В., Брызгин А. А., Воронин Л. А., Горбунов В. А., Панфилов А. Д., Подобаев В. С., Радченко В. М., Ткаченко В. О., Факторович Б. Л., Ческидов В. Г., Штарклев Е. А.. Импульсный высокочастотный линейный ускоритель электронов ИЛУ-8. ПТЭ, 2009, № 3, С. 98-103.
3. Auslender V. L., Bryazgin A. A., Chernov K. N., Cheskidov V. G., Faktorovich B. L., Kuznetsov G. I., Makarov I. G., Ostreiko G. N., Panfilov A. D., Serdobintsev G. V., Tarnetsky V. V., Tiunov M. A. Latest experiments on 5 MeV section for high-power modular accelerator for e-beam and X-ray processing. Radiation Physics and Chemistry, Vol 78, Issues 7-8, 2009, 741-744.
4. Bezuglov V.V, Bryazgin A.A., Voronin L.A., Gorbunov V.A., Kokin E.N., Korobeynikov M.V., Lukin A.N., Makarov I.G., Maximov S.A, Panfilov A.D., Podobaev V.S., Radchenko V.M., Sidorov A.V., Tarnetskiy V.V., Tiunov M.A., Tkachenko V.O., Faktorovich B.L., Shtarklev E.A., Chernov K.N.. Sterilization complexes based on ILU-type electron accelerators // Nuclear Science and Techniques, Vol.22 No.1, 2011. Shanghai, China. ISSN 1001-8042. CN 31 – 1559 / TL.
5. Брызгин А.А., Безуглов В.И., Кокин Е.Н., Коробейников М.В., Кузнецов Г.И., Макаров И.Г., Острейко Г.Н., Панфилов А.Д., Радченко В.М., Сердобинцев Г.В., Сидоров А.В., Тарнецкий В.В., Тиунов М.А., Факторович Б.Л., Чернов К.Н., Ческидов В.Г.. Промышленный линейный ускоритель электронов модульного типа ИЛУ-14 // Приборы и техника эксперимента, 2011, № 3, С. 5–21. Москва. УДК 621.384.6.
6. Радиолиз углеводов: некоторые физико-химические проблемы. Под редакцией А.В. Топчиева, Л.С. Полака. Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева. Изд-во Академии наук СССР, 1962.
7. <http://www.iba-industrial.com/accelerators#rhodotron-e-beam-accelerator>