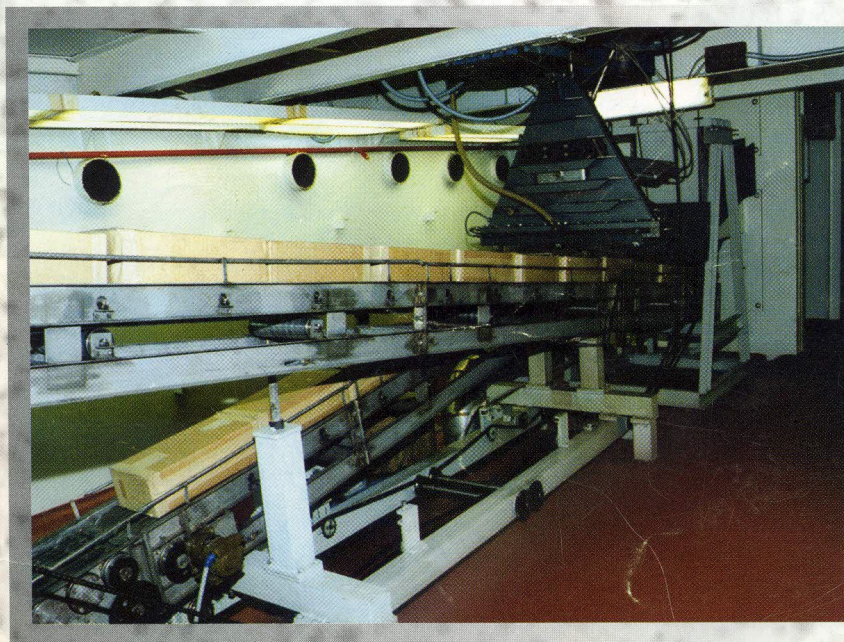


# НУМЖО

## ПРОИЗВОДСТВУ

№7'2003

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера  
СО РАН (г. Новосибирск)



Ускорители электронов  
и электронно-лучевые технологии

3

# ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск)



Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН основан в 1958 году и в настоящее время является одним из крупнейших физических центров России. Он располагает научными и инженерными кадрами высшей квалификации, обладает мощной экспериментальной базой, значительным конструкторским отделом и развитым производством, которые обеспечивают его научную деятельность. Фундаментальные исследования связаны с физикой элементарных частиц, ядерной физикой, физикой ускорителей и накопителей заряженных частиц, физикой плазмы и термоядерным синтезом,

синхротронным излучением и лазерами на свободных электронах.

Одним из основополагающих принципов деятельности института является плодотворное сочетание фундаментальных и прикладных исследований. Этот принцип был выдвинут и реализован в работе института его организатором и бессменным руководителем на протяжении 20 лет академиком Гершелем Ицковичем Будкером. Он сохраняется и в настоящее время его последователями и учениками. Используя результаты фундаментальных исследований, институт разрабатывает и создает комплекс различного оборудования и приборов, которые поставляются на внутренний и зарубежные рынки уже в течение более 35 лет. Эта деятельность института включает в себя разработку и создание, в частности, такого специального оборудования и приборов для научных и промышленных целей, как промышленные ускорители электронов, источники синхротронного излучения, ионные имплантеры, элементы систем управления и контроля, цифровые рентенографические установки для медицинской диагностики и другое оборудование. Это оборудование используется для электронно-лучевой обработки различных полимерных изделий, очистки муниципальных и промышленных сточных вод и отходящих газов тепловых электростанций, изготовления различных медицинских изделий и приборов и др.

Особенно известен институт своими поставками внутри страны и за рубеж ускорителей электронов для научного и промышленного использования, на основе которых созданы научно-исследовательские центры по отработке электронно-лучевых технологий и ряд промышленных производств. В последнее время поставки ускорителей электронов стали сопровождаться различным вспомогательным технологическим оборудованием, предназначенным для транспортировки материалов в зоне излучения. При этом заказчики получают различные электронно-лучевые технологии, разработанные как сотрудниками ИЯФ СО РАН, так и его многочисленными партнерами из научно-исследовательских институтов промышленности России. Для отработки технологических процессов ИЯФ СО РАН имеет оборудованные ускорителями электронов постоянно действующие стенды, которые предоставляются для работы организациям-разработчикам электронно-лучевых технологий. Кроме того, этим организациям предоставляется возможность апробации разрабатываемых ими процессов также и на стендах с новыми промышленными ускорителями в процессе их отработки.

Кроме России, ускорители электронов института поставлены и успешно используются в Польше, Болгарии, Венгрии, Индии, Италии, Китае, Румынии, Чехии, ФРГ, Южной Корее, Японии, а также в ряде стран СНГ – Украине, Белоруссии, Казахстане.

Институт также разрабатывает и поставляет в Россию и за рубеж специальное оборудование для ускорителей, сооружаемых в крупнейших физических центрах Швейцарии, Китая, США, Германии, Японии, Южной Кореи и других стран для фундаментальных исследований в области физики элементарных частиц.

630090, г. Новосибирск,  
просп. академика Лаврентьева, 11,  
ИЯФ им. Г.И.Будкера СО РАН  
Тел.: (3832) 34-10-31  
Факс: (3832) 34-21-63  
E-mail: Root@inp.nsk.su  
Http://www.inp.nsk.su

## УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ И ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ (РАДИАЦИОННЫЕ) ТЕХНОЛОГИИ

Р.А.САЛИМОВ, Г.А.СПИРИДОНОВ, С.Н.ФАДЕЕВ

*Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН*

В середине 1960-х годов в одном из номеров газеты «Известия» (1 августа 1965 г., № 180) была опубликована статья «Радиацию – в промышленность», написанная выдающимся физиком и замечательным организатором науки, первым директором Института ядерной физики Сибирского отделения Академии наук академиком Гершем Ицковичем Будкером. Многие положения этой статьи до настоящего времени остаются интересными и заслуживающими внимания.

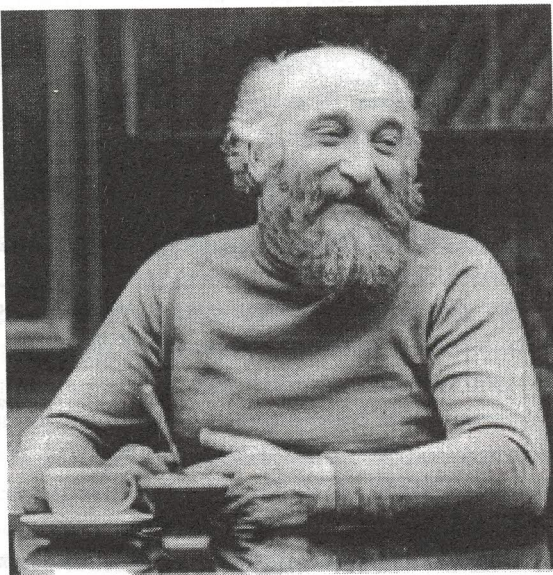
Обосновывая выдвинутый в заголовке статьи призыв, академик Г.И.Будкер изложил ряд возможностей промышленного использования излучений высокой энергии или, как он называл, атомных излучений.

Уже тогда Г.И.Будкер писал о возможности широкого использования радиации при обработке сельскохозяйственной продукции: картофеля (для увеличения срока его хранения), зерна (для облегчения борьбы с насекомыми-вредителями на элеваторах). Кроме того, он обращал внимание на быстрое развитие за рубежом обработки таким способом и других пищевых

продуктов: мяса, рыбы, ягод, фруктов. Обработка этих продуктов излучением увеличивает как срок их хранения, так и активность ряда вредных микроорганизмов и насекомых. В статье отмечалась также возможность широкого использования излучения для стерилизации медикаментов, обработки автомобильных шин и для других производственных целей.

В целом отмечая, что список «профессий» настолько обширен, что «невозможно перечислить все отрасли народного хозяйства, в которых она (радиация) не была бы полезна, и что ее широкое использование дало бы огромный доход государству», академик Будкер писал, что применение радиации в то же время ничтожно мало. Среди главных причин этого он упоминал две, которые считал необходимым отметить особо: это «чувство суеверного страха перед радиацией вообще» и отсутствие мощных источников излучений, подходящих для использования в заводских условиях.

В статье было убедительно показано, что наиболее удобным источником излучения для промышленного использования являются ускорители заряженных частиц. В то время существовало мнение, что ускорители практически не могут давать большой интенсивности излучения и вряд ли будут обладать высоким коэффициентом полезного действия. Академик Будкер замечал, однако, что «эти представления рассеиваются и можно с уверенностью говорить, что развитие крупнотоннажных и массовых производств будет связано именно с использованием ускорителей». Действительно, как было показано позже, эти устройства обладают рядом достоинств. Они способны генерировать излучение большой мощности и тем самым обеспечивать выпуск значительного объема продукции с хорошей эффективностью генерации и использования излучения. Кроме того, ускорители совершенно безопасны в выключенном состоянии, как безопасны для врача и пациента рентгеновские пленки, подвергнувшиеся воздействию интенсивного из-



*Академик Г.И.Будкер*

лучения. Ни изотопы, ни ядерные реакторы, ни их отработавшие тепловыделяющие элементы таким свойством не обладают. В выключенном состоянии все элементы ускорителей с достаточной для многих промышленных применений энергией электронов ведут себя как обычные электротехнические устройства.

С момента публикации указанной статьи прошло немало времени. К настоящему времени накопилось огромное число данных о процессах, происходящих под действием излучений высокой энергии. Использование радиации позволило получить множество новых химических соединений. Появилась новая научная дисциплина – радиационная химия, разработавшая в свою очередь основы промышленных радиационно-технологических процессов, использующих в качестве источников ионизирующего излучения ускорители электронов, получивших название электронно-лучевых.

Электронно-лучевые технологии (ЭЛТ) используют воздействие на вещество электронов высокой энергии для изменения тех или иных его свойств, при этом образуется большое количество вторичных электронов с более низкой энергией. Эти электроны вовлекаются в процессы ионизации и возбуждения атомов, образования активных радикалов, разрыва и образования молекулярных связей, инициирующих различные химические реакции и вызывающих в конечном итоге требуемые изменения свойств облучаемого материала. Такие превращения называют радиационно-химическими или электронно-химическими, если нужно обратить внимание на его химическую основу.

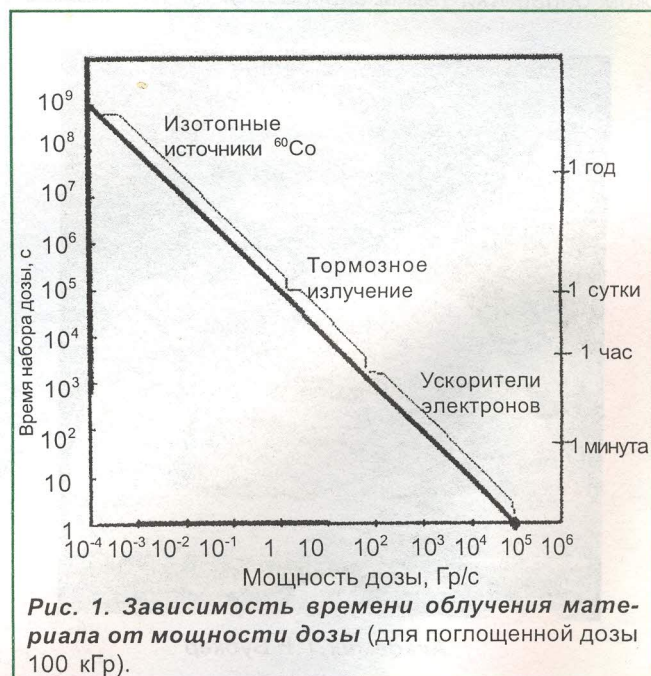
При облучении мощными потоками электронов неорганических веществ одновременно они нагреваются электронным пучком до высоких температур. При этом в них происходят более интенсивные превращения, чем при обычном нагреве до тех же температур. В отсутствие нагрева эти превращения не происходят, несмотря на облучение любыми дозами. Такие процессы получили название радиационно-термических. В настоящее время во всем мире использование электронно-лучевых технологий позволяет производить промышленную продукцию на десятки миллиардов долларов, и эти цифры увеличиваются с каждым годом. ЭЛТ проникают во все новые отрасли промышленного производства, вытесняя более вредные и менее эффективные с экономической точки зрения традиционные технологии. Такое бурное внедрение электронно-лучевых технологий обусловлено их высокими технико-экономическими показателями и прежде всего энергетической эффективностью генерации

и использования излучения, возможностью дозирования излучения с высокой точностью, отсутствием наведенной радиоактивности в облученной продукции, высокой степенью автоматизации технологического процесса.

Направленность генерируемого ускорителями излучения и высокая равномерность облучения объекта также выгодно отличают их от других источников излучения. Изотопные источники испускают гамма-кванты изотропно, т.е. равномерно во все стороны, к тому же по мере удаления от источника интенсивность излучения значительно уменьшается. Пучок электронов можно направить непосредственно в облучаемый объект и с заданной степенью равномерности, что обеспечивает существенно большую эффективность использования энергии.

Другим преимуществом ускорителей по сравнению с альтернативными источниками является значительно большая интенсивность излучения, позволяющая сократить время облучения и соответственно повысить производительность радиационно-технологических установок на их основе. Кроме того, по сравнению с изотопными и другими источниками электронные ускорители позволяют получить значительно меньшие затраты в расчете на одинаковую интенсивность излучения.

На рис. 1 показана зависимость времени облучения материала от мощности дозы для трех основных типов излучателей, используемых в радиационно-тех-



нологических процессах: кобальтового  $\gamma$ -источника, ускорителя как источника тормозного излучения и ускорителя как источника электронов. Приведенная зависимость определена для наиболее широко распространенной в радиационной химии полимеров поглощенной дозы 100 кГр. Значения мощности поглощенной дозы перекрывают типичный диапазон, используемый в радиационных процессах. Из рисунка видно, что необходимое время облучения для разных источников отличается на несколько порядков. При этом высокие значения мощности поглощенной дозы (более 100 Гр/с) могут быть получены только с помощью ускорителей электронов. Из рисунка видно также, что с использованием ускорителей электронов требуемые поглощенные дозы могут быть реализованы за время порядка секунды и даже меньше, что является их преимуществом перед остальными источниками излучений с точки зрения производительности технологических процессов.

Наконец, создание систем выпуска в атмосферу интенсивного сфокусированного электронного пучка значительно расширило границы потенциального применения ускорителей электронов, предопределило использование их не только в радиационно-химических, но и в радиационно-термических и термических процессах, что позволяет создавать принципиально новые, уникальные технологии. И хотя эти процессы еще не истребованы в массовом промышленном производстве, полученные экспериментальные результаты дают возможность с уверенностью называть процессы такого рода технологиями завтрашнего дня.

Среди преимуществ промышленных ускорителей электронов необходимо отметить и то обстоятельство, что они, в отличие от других источников излучения, при необходимости могут быть выключены практически мгновенно. А в выключенном состоянии ускорители абсолютно безопасны, что, несомненно, предпочтительнее с точки зрения радиационной безопасности.

Основные параметры ускорителей электронов – энергия и ток пучка ускоренных электронов. Чем выше энергия, тем на большую глубину электроны могут проникать в облучаемый объект. Энергия электронов измеряется в электрон-вольтах и его производных – килоэлектрон-вольтах или мегаэлектрон-вольтах. Ток пучка характеризует количество ускоренных электронов, взаимодействующих с веществом. Ток пучка в 1 А соответствует интенсивности потока электронов  $6,25 \times 10^{18}$  эл/с. Производство тока пучка на энергию

электронов в пучке определяет мощность электронного пучка, которая характеризует производительность установки.

На сегодняшний день для осуществления различных промышленных радиационных процессов создано значительное количество типов ускорителей, отличающихся режимом работы, использованием в ускорителях легких (электроны) или тяжелых частиц (протоны или ионы), генерацией непрерывного или импульсного пучка и прочими особенностями.

Наибольшее количество промышленных радиационных процессов осуществляется с использованием так называемых ускорителей электронов прямого действия. Это наиболее простые и дешевые ускорители. В них заряженные частицы приобретают необходимую энергию при однократном прохождении ускоряющей разности потенциалов. Энергия ускоренных частиц обычно не превышает 5 МэВ, что достаточно для радиационной обработки изделий значительной толщины. При необходимости значительного увеличения глубины проникновения излучения такие ускорители могут быть снабжены системами конверсии ускоренных электронов в тормозное рентгеновское излучение. Мощность ускорителей прямого действия достигает нескольких сот киловатт, что соответствует предельным производительностям современного подпучкового оборудования.

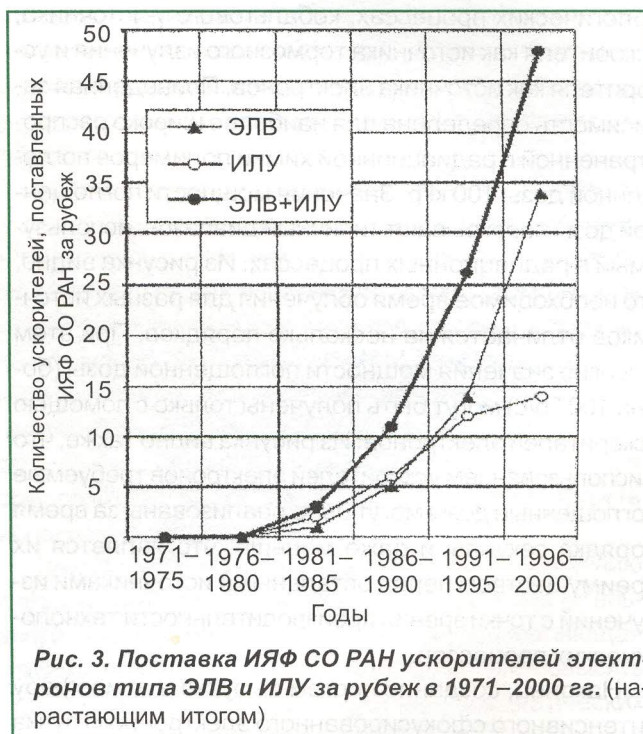
В настоящее время общее количество ускорителей в мире превысило 13 тысяч. Из них в фундаментальной физике высоких энергий для изучения строения микромира применяется немногим более 100 установок. Почти 6000 ускорителей используется в медицинских целях (включая радиационную терапию, производство медицинских радиоизотопов и т.д.). Приблизительно такое же количество ускорителей применяется для ионной имплантации и модификации поверхности различных материалов. Более чем 1500 ускорителей нашли применение в радиационных технологических процессах. Именно к этим ускорителям относится термин «промышленные ускорители».

На сегодняшний день в мире существует несколько фирм-производителей промышленных ускорителей. Наиболее известные производители за пределами России – **Nissin High Voltage Co. (NHV)**, **High Voltage Engineering Corporation (HVEC)**, а также **Radiation Dynamics, Inc (RDI)**. Производимые ими ускорители охватывают диапазон энергий от 300 до 5000 кэВ, мощность пучка достигает 150 кВт. Все эти ускорите-

ли отличаются высокой надежностью в эксплуатации, а также высоким коэффициентом конверсии электрической энергии в энергию электронного пучка.

Основные разработчики и изготовители отечественных ускорителей – **Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Ефремова (НИИЭФА, г. Санкт-Петербург), Московский радиотехнический институт (МРТИ) и Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН (ИЯФ, г. Новосибирск).**

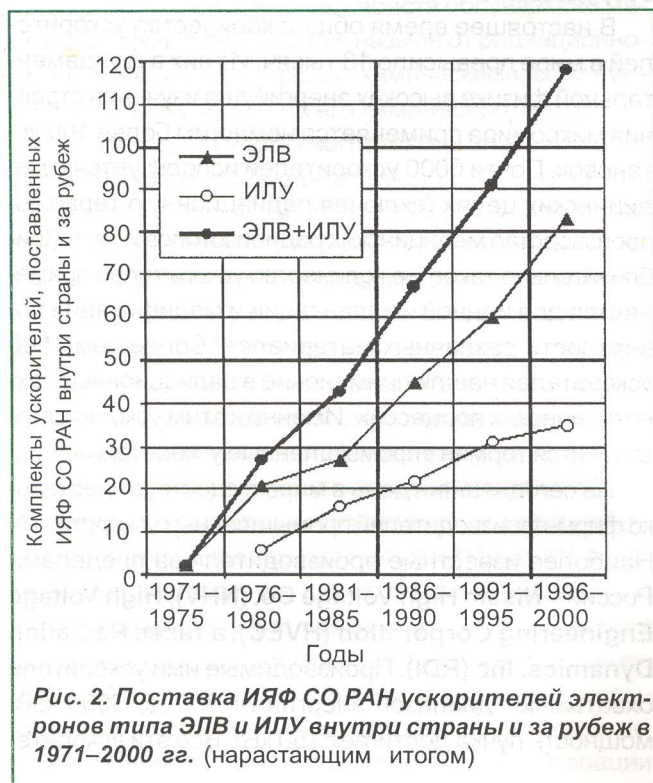
Среди различных типов ускорителей, разработанных ИЯФ СО РАН для промышленного использования, наибольшую известность как в нашей стране, так и за рубежом приобрели ускорители типа ЭЛВ и ИЛУ. По своим параметрам, надежности и соотношению цена/качество ускорители ЭЛВ и ИЛУ не только не уступают ускорителям других типов, но и во многом превосходят их, что позволяет ИЯФ СО РАН успешно конкурировать с другими производителями на мировом рынке. В настоящее время институтом выпускается свыше 10 моделей этих ускорителей, которые поставляются как на внутренний, так и на зарубежные рынки. Почти 120 ускорителей указанных типов изготовлено и поставлено различным организациям нашей страны и зарубежным фирмам для работы в промыш-



**Рис. 3. Поставка ИЯФ СО РАН ускорителей электронов типа ЭЛВ и ИЛУ за рубеж в 1971–2000 гг. (нарастающим итогом)**

ленных радиационно-химических процессах, а также для исследовательских целей. Динамика поставок этих ускорителей представлена графиками на рис. 2 и 3. Из этих данных видно, что за последние пять лет значительную долю в поставках составляли зарубежные (особенно в отношении ускорителей ЭЛВ). С учетом других типов ускорителей, произведенных институтом, общий объем их поставок превысил 150 комплектов. При этом в последние годы ускорители ЭЛВ и ИЛУ активно приобретают фирмы Японии, Южной Кореи, Китая и США. Краткое описание ускорителей и технологий, освоенных с их использованием, приводится в последующих статьях данного выпуска журнала. Краткий перечень ЭХТ, разработанных и реализованных в нашей стране и за рубежом с использованием ускорителей ИЯФ, помещен на третьей странице обложки журнала.

В 1960-е годы многие положения, высказанные Г.И.Будкером, казались фантастикой – не было технологий и промышленных ускорителей электронов достаточной мощности и надежности. Были только идеи и большое желание их реализовать у тех, кто верил в новое дело так, как верил в него Будкер. За прошедшие годы стала со всей очевидностью ясна важность и других положений, определяющих использование нового оборудования и технологий, – прежде всего, востребованность их обществом и промышленностью.



**Рис. 2. Поставка ИЯФ СО РАН ускорителей электронов типа ЭЛВ и ИЛУ внутри страны и за рубежом в 1971–2000 гг. (нарастающим итогом)**

## УСКОРИТЕЛИ СЕРИИ ЭЛВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В РАДИАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

М.Э.ВЕЙС, Ю.И.ГОЛУБЕНКО, Н.К.КУКСАНОВ, П.И.НЕМЫТОВ,  
В.В.ПРУДНИКОВ, Р.А.САЛИМОВ, С.Н.ФАДЕЕВ, В.Г.ЧЕРЕПКОВ

*Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН*

Начиная с 1971 года в Институте ядерной физики СО РАН разрабатываются и производятся ускорители электронов серии ЭЛВ, предназначенные для применения в промышленных и исследовательских радиационно-технологических установках. Конструктивные и схемные решения этих ускорителей предусматривают длительную непрерывную и круглосуточную работу ускорителей в условиях промышленного производства. Отличительными качествами ускорителей ЭЛВ являются простота конструкции, удобство в эксплуатации и надежность в работе.

Институт предлагает к реализации серию ускорителей электронов типа ЭЛВ, которые перекрывают диапазон энергий от 0,2 до 2,5 МэВ, с током пучка ускоренных электронов до 400 мА и максимальной мощностью до 400 кВт. Основные параметры ускорителей приведены в табл. 1.

Ускорители серии ЭЛВ – наиболее массовый тип отечественных ускорителей, нашедших практическое применение во многих областях радиационной химии, а также давших толчок развитию радиационно-тер-

мических технологий благодаря созданию системы выпуска в атмосферу мощного сфокусированного электронного пучка. Большая мощность электронного пучка обеспечивает высокую производительность электронно-лучевой обработки, а высокая эффективность преобразования электрической энергии в энергию ускоренных электронов снижает затраты на обработку.

По своим параметрам ускорители ЭЛВ не только не уступают лучшим мировым образцам, но во многом превосходят их. Поэтому ИЯФ СО РАН традиционно занимает ведущие позиции среди мировых фирм–производителей ускорителей электронов. Многие компании, использовавшие ранее другие ускорители, в настоящее время приобретают ускорители серии ЭЛВ. Так, в Южной Корее на крупном кабельном заводе рядом с ранее установленными японскими ускорителями работают ускорители ИЯФ серии ЭЛВ. Такие же совместные установки имеются и в Китае. Как специалисты Кореи и Китая, так и наши специалисты имеют возможность сравнить работоспособность ускорителей, созданных

Таблица 1

**Основные параметры ускорителей серии ЭЛВ**

Ускорители	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	1,0–1,5	50	40
ЭЛВ-6	0,8–1,2	100	100
ЭЛВ-6М	0,75–1,0	160	200
ЭЛВ-8	1,0–2,5	90	50
ЭЛВ-12	0,6–1,0	400	400

разными производителями. В Китае даже создана ассоциация пользователей ускорителей ЭЛВ. К настоящему времени как внутри страны, так и за рубежом поставлено более 80 ускорителей этой серии, а их суммарная наработка превышает 600 ускорителе-лет.

В табл. 2 представлены основные направления применения ускорителей серии ЭЛВ.

Таблица 2

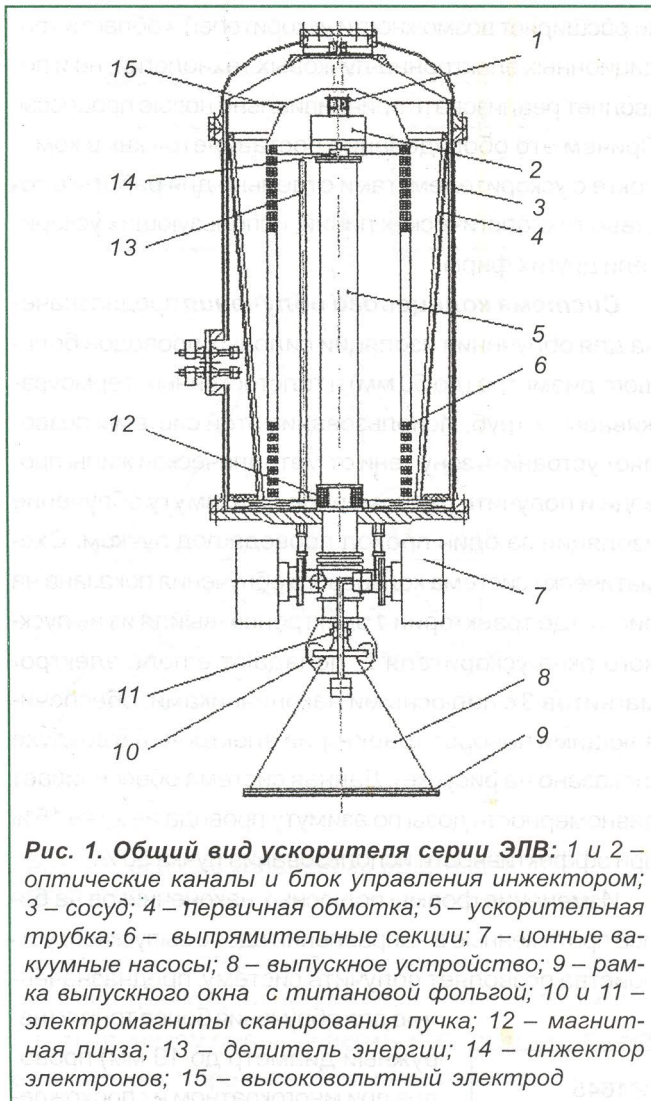
## География поставок и области использования ускорителей серии ЭЛВ

Тип технологии	Страна-покупатель	Количество ускорителей
<b>Модифицирование полимерных изделий</b>		
Модифицирование полиэтиленовой изоляции для производства термостойких проводов и кабелей сечением 0,5 – 120 мм <sup>2</sup> (производительность до 400 м/мин)	Россия	7
	Белоруссия	5
	Украина	5
	Чехия	1
	Китай	12
Производство термоусаживаемых трубок, пленок и лент (производительность до 1000 кг/ч)	Ю. Корея	6
	Россия	3
	Молдавия	2
Производство искусственных кож и резинотехнических изделий (производительность до 1000 м <sup>2</sup> /ч)	Китай	5
	Ю. Корея	1
Производство пренпрега и геля	Россия	2
Отверждение лакокрасочных покрытий на различных основах для стройиндустрии (производительность до 500 м <sup>2</sup> /ч)	Россия	2
	Казахстан	1
	Узбекистан	1
<b>Технологии для экологических целей</b>		
Обработка сточных вод	Россия	4
	Ю. Корея	1
Очистка отходящих газов тепловых станций от окислов серы и азота (производительность до 20 000 м <sup>3</sup> /ч)	Россия	1
	Польша	2
	Япония	2
	Украина	1
<b>Другие применения</b>		
Поверхностная наплавка и закалка металлов, производство катализатора синтеза аммиака и спецкерамики, развитие высокотемпературных химических технологий	Россия	4
	Украина	1
Дезинсекция зерна (производительность до 200 т/ч)	Россия	1
	Украина	2
Исследовательские цели	Россия	5
	Болгария	1
	Германия	1
	Ю. Корея	3

Ускорители серии ЭЛВ являются ускорителями прямого действия. Общий вид ускорителя с фольговым выпуском пучка в атмосферу показан на рис. 1. В качестве источника ускоряющего напряжения в этих устройствах используется каскадный генератор с параллельной индуктивной связью. Первичная обмотка генератора, высоковольтный выпрямитель, а также ускорительная трубка помещены в герметичный сосуд, заполняемый электроизолирующим газом под давлением в несколько атмосфер. Вследствие такой компоновки, а также благодаря удачным конструктивным решениям ЭЛВ являются наиболее компактными в своем классе ускорителей. Эмиссия электронов произ-

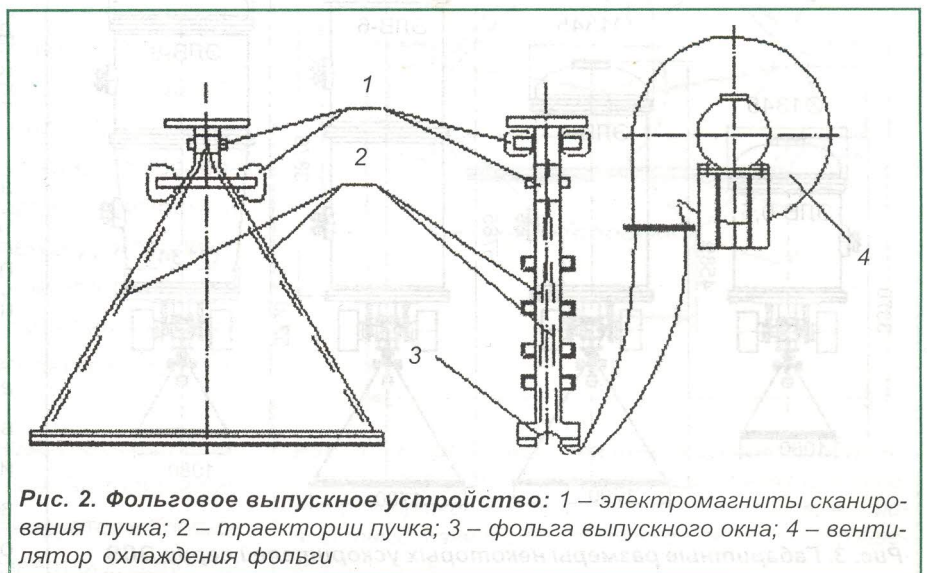
водится катодом, расположенным в верхней части ускорительной трубки. Пройдя полную разность потенциалов, приложенную к ускорительной трубке, электроны приобретают энергию, равную напряжению высоковольтного выпрямителя. Далее они попадают в выпускное устройство, где с помощью электромагнитов развертки равномерно распределяются по фольге, отделяющей вакуумную систему ускорителя от атмосферы. Традиционное устройство для вывода пучка в атмосферу через фольгу показано на рис. 2. С помощью электромагнитов электронный пучок сканирует по фольге в двух взаимно перпендикулярных направлениях, благодаря чему фольга полностью за-





**Рис. 1. Общий вид ускорителя серии ЭЛВ:** 1 и 2 – оптические каналы и блок управления инжектором; 3 – сосуд; 4 – первичная обмотка; 5 – ускорительная трубка; 6 – выпрямительные секции; 7 – ионные вакуумные насосы; 8 – выпускное устройство; 9 – рамка выпускного окна с титановой фольгой; 10 и 11 – электромагниты сканирования пучка; 12 – магнитная линза; 13 – делитель энергии; 14 – инжектор электронов; 15 – высоковольтный электрод

полняется. Охлаждается она высокоскоростной воздушной струей. Средняя плотность тока на фольге не превышает  $0,1 \text{ mA/cm}^2$ , а максимальная величина выводимого тока –  $70 \text{ mA/m}$  длины фольги, что примерно вдвое меньше, чем максимально допустимое значение плотности тока на фольге для используемой скорости струи. Двукратный запас по плотности тока через фольгу обеспечивает практически неограниченный срок ее службы.



**Рис. 2. Фольговое выпускное устройство:** 1 – электромагниты сканирования пучка; 2 – траектории пучка; 3 – фольга выпускного окна; 4 – вентилятор охлаждения фольги

Для снижения габаритов питание ускорителя ЭЛВ осуществляется от электромашинного преобразователя частоты либо от статического инвертора повышенной частоты. В первом случае КПД ускорителя составляет 65–70%. Использование транзисторного преобразователя позволяет поднять эффективность преобразования электрической энергии в энергию электронного пучка до 85–90%.

Ускорители ЭЛВ стабильны в работе. Нестабильность энергии и тока пучка не превышает  $\pm 2\%$ .

Система управления промышленным ускорителем в значительной степени определяет его эксплуатационные характеристики. Она включает в себя комплекс аппаратных и программных средств, охватывающий все узлы ускорителя, требующие оперативного управления, контроля и диагностики. Многофункциональность системы управления позволяет:

- автоматизировать процесс управления ускорителем. Алгоритмы, заложенные в программу управления ускорителем, выполняют задачи подготовки ускорителя и технологического оборудования к работе, следят за состоянием блокировок, после включения ускорителя выводят на заданный режим энергию и ток электронного пучка;
- надежно стабилизировать основные параметры электронного пучка (энергия электронов, ток пучка, размер и положение раstra на фольге выпускного

окна), что обеспечивает высокое качество радиационной обработки;

- обеспечить в процессе работы ускорителя непрерывную диагностику высоковольтного выпрямителя и самотестирование других систем ускорителя;
- синхронизировать работу ускорителя и технологического оборудования, при этом возможна эксплуатация ускорителя в составе технологической линии в полностью автоматизированном режиме, т.е. без участия оператора. Именно такие режимы и используются на поставленных в последнее время ускорителях;
- предоставляет обслуживающему персоналу широкий набор команд для предварительного задания режимов, тестирования и наладки ускорителя.

Программное обеспечение системы управления ускорителем обеспечивает дружелюбный интерфейс с пользователем посредством системы динамических меню, текстовой и графической визуализации режима работы ускорителя.

Рис. 3 дает представление о габаритных размерах некоторых ускорителей серии ЭЛВ.

Дополнительное подпучковое оборудование (транспортные устройства, системы кольцевого, 2- и 4-стороннего облучения, устройство для вывода в атмосферу сфокусированного электронного пучка) не толь-

ко расширяет возможности ускорителей в области традиционных электронно-пучковых технологий, но и позволяет реализовать принципиально новые процессы. Причем это оборудование поставляется как в комплекте с ускорителем, так и отдельно для работы в составе технологических линий, использующих ускорители других фирм.

**Система кольцевого облучения** предназначена для облучения изоляции силовых проводов большого диаметра (до 50 мм) и толстостенных термоусаживаемых труб. Использование этой системы позволяет устранить зону тени от металлической жилы провода и получить равномерное по азимуту облучение изоляции за один проход провода под пучком. Схематически система кольцевого облучения показана на рис. 4, где траектории 1 электронов, выйдя из выпускного окна ускорителя 2, попадают в поле электромагнитов 3 с полюсными наконечниками, обеспечивающими поворот траекторий электронов в воздухе (показано на рисунке). Данная система обеспечивает равномерность дозы по азимуту провода не хуже 15% при эффективности использования пучка 50%.

Изменение формы полюсных наконечников на более протяженные в направлении вдоль выпускного устройства позволяет получить систему, предназначен-

ную для облучения более тонких (наружный диаметр до 19 мм) проводов при многократном их прохождении под пучком, что обеспечивает двухстороннее облучение проводов (сверху и снизу) при ширине раскладки до 60 см.

Описанные устройства успешно эксплуатируются вместе с ускорителями ЭЛВ-8 (максимальная энергия 2,5 МэВ) на нескольких кабельных заводах Китая.

**Система четырехстороннего облучения** применяется для повышения однородности облучения изоляции проводов. Раскладка провода под пучком выполнена таким образом, что на каждом витке верх-

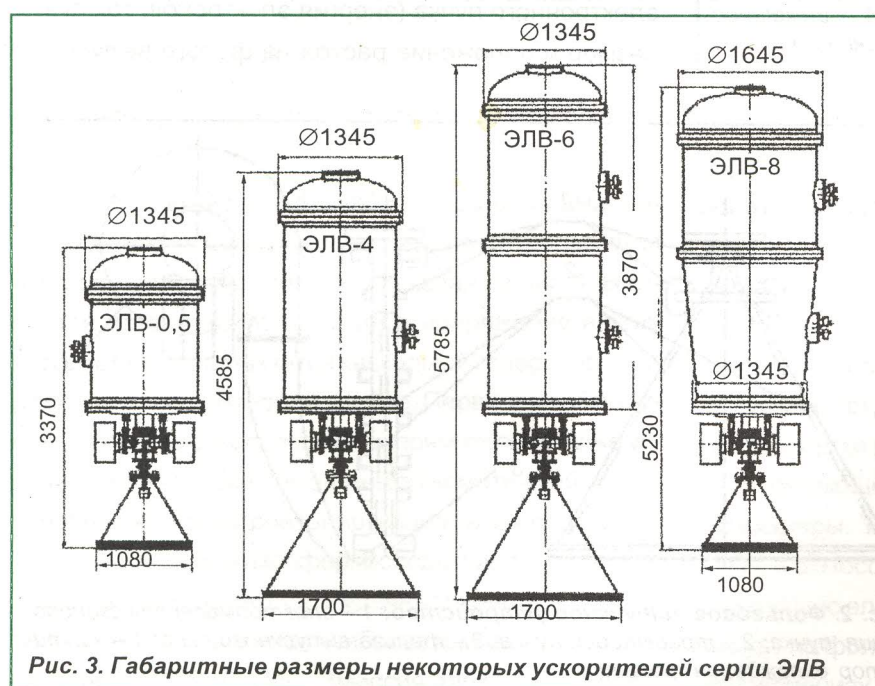


Рис. 3. Габаритные размеры некоторых ускорителей серии ЭЛВ

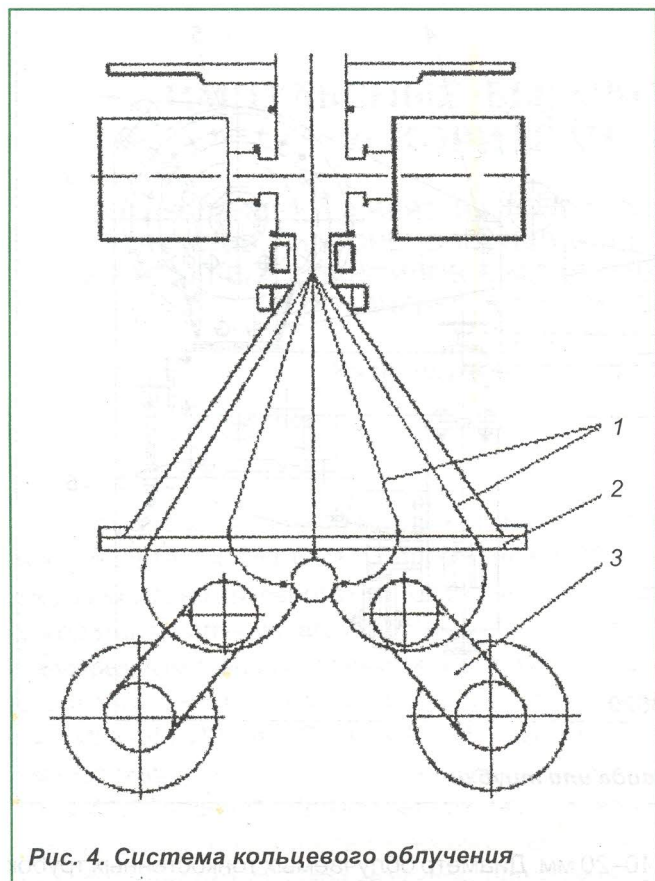


Рис. 4. Система кольцевого облучения

ная и нижняя поверхности провода меняются местами. Если траектории пучков перекрещены под углом  $90^\circ$ , то (с учетом смены поверхностей) в итоге получается четырехстороннее облучение изделия.

В подтверждение достоинств такого способа облучения отметим, что ведущие западные фирмы, применяющие электронно-пучковые технологии, используют в одной установке два ускорителя электронов, пучки которых пересекаются под углом  $90^\circ$ .

Установка двух ускорителей, да еще и с поворотом пучка, существенно увеличивает стоимость и сложность технологического комплекса. Для реализации 4-стороннего облучения на одном ускорителе серии ЭЛВ в ИЯФ СО РАН разработано два варианта системы такого облучения (схема одного из вариантов показана на рис. 5).

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  $45^\circ \pm 5^\circ$ .

Конфигурация магнитного поля определяется формой полюсов электромагнита. Эта задача для заданных траекторий пучка была решена методами компьютерного моделирования. Поскольку невозможно сформировать магнитное поле, мгновенно меняющее направление, между поворотными магнитами существует область, где конфигурация магнитного поля отличается от необходимой. В этой области *a* (рис. 5) угол выхода электронов будет отличаться от  $45^\circ$ . Наличие таких электронов приводит к снижению равномерности облучения и эффективности использования пучка. Чтобы уменьшить влияние данного эффекта, необходимо уменьшить время прохождения электронным пучком области *a*. Для этой цели, наряду с магнитами сканирования, установлен дополнительный пе-

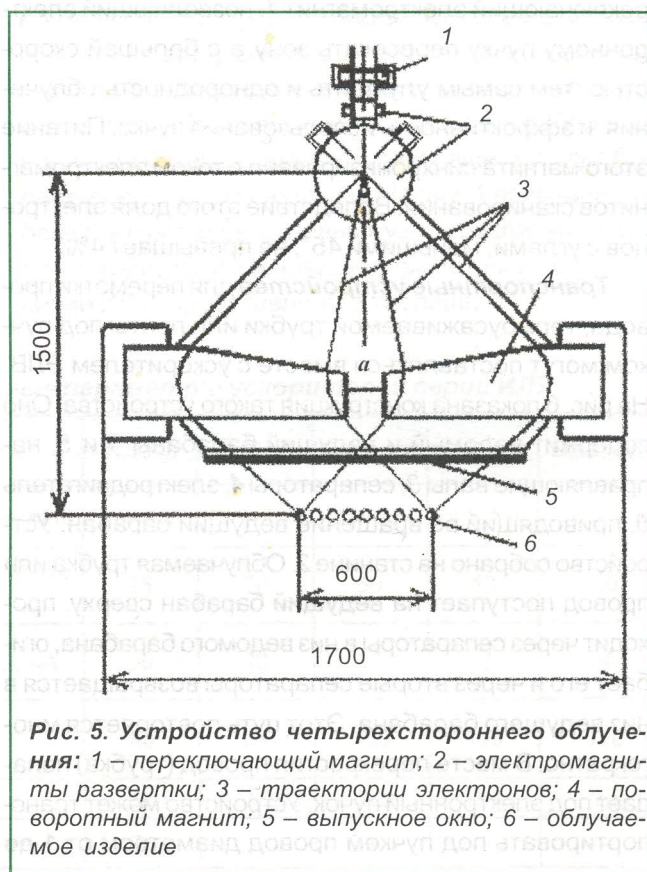


Рис. 5. Устройство четырехстороннего облучения: 1 – переключающий магнит; 2 – электромагниты развертки; 3 – траектории электронов; 4 – поворотный магнит; 5 – выпускное окно; 6 – облучаемое изделие

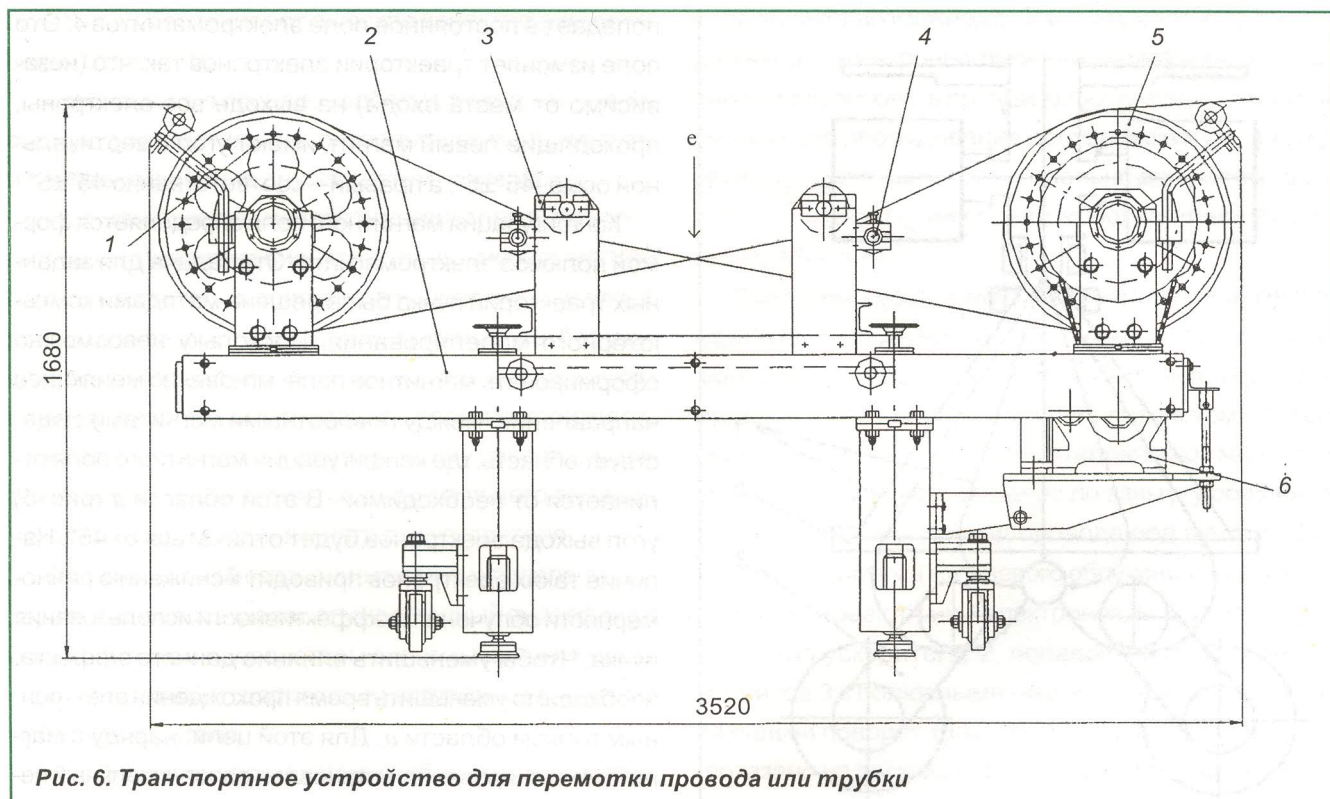


Рис. 6. Транспортное устройство для перемотки провода или трубки

реключающий электромагнит 1, позволяющий электронному пучку пересекать зону а с большей скоростью, тем самым улучшить и однородность облучения, и эффективность использования пучка. Питание этого магнита синхронизировано с током электромагнитов сканирования. Вследствие этого доля электронов с углами, меньшими  $45^\circ$ , не превышает 4%.

**Транспортные устройства** для перемотки провода, термоусаживаемой трубки или ленты под пучком могут поставляться вместе с ускорителем ЭЛВ. На рис. 6 показана конструкция такого устройства. Оно содержит ведомый и ведущий барабаны 1 и 5, направляющие валы 3, сепараторы 4, электродвигатель 6, приводящий во вращение ведущий барабан. Устройство собрано на станине 2. Облучаемая трубка или провод поступает на ведущий барабан сверху, проходит через сепараторы в низ ведомого барабана, огибает его и через вторые сепараторы возвращается в низ ведущего барабана. Этот путь повторяется многократно. В месте перекрестия провод (трубка) попадает под электронный пучок. Устройство может транспортировать под пучком провод диаметром от 1 до

10–20 мм. Диаметр облучаемых тонкостенных трубок может достигать 60 мм. Ширина раскладки облучаемого материала под пучком достигает 1200 мм. Шаг раскладки определяется переключаемыми сепараторами. Максимальная скорость транспортного устройства 400 м/мин. При облучении тонких проводов или трубок и мощности ускорителя около 100 кВт такая скорость обеспечивает суточную производительность в несколько сотен километров.

Высокомоментный двигатель постоянного тока вместе с системой управления обеспечивают диапазон регулирования скорости до  $10^4$ , что позволяет соблюдать постоянство дозы при пуске ускорителя, его останове и при любых случайных флуктуациях тока пучка. Принятая схема транспортировки (повернутая «восьмерка») обеспечивает двухстороннее облучение.

Для успешного внедрения радиационных технологий в промышленность в будущем должны создаваться комплексные технологические установки, включающие в себя как собственно ускоритель, так и транспортные устройства, системы контроля качества облучения и т.д.

## ИМПУЛЬСНЫЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ ИЛУ

**В.Л.АУСЛЕНДЕР, А.А.БРЯЗГИН, Л.А.ВОРОНИН, Г.Б.ГЛАГОЛЕВ, И.В.ГОРНАКОВ, Е.Н.КОКИН,  
Г.С.КРАЙНОВ, Г.И.КУЗНЕЦОВ, А.Н.ЛУКИН, И.Г.МАКАРОВ, С.А.МАКСИМОВ, С.В.МИГИНСКИЙ,  
В.Е.НЕХАЕВ, А.Д.ПАНФИЛОВ, В.М.РАДЧЕНКО, Н.Д.РОМАШКО, А.В.СИДОРОВ, М.А.ТИУНОВ,  
В.О.ТКАЧЕНКО, А.А.ТУВИК, Б.Л.ФАКТОРОВИЧ, В.Г.ЧЕСКИДОВ**

*Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН*

К разработке линейных импульсных высокочастотных ускорителей ИЯФ СО РАН приступил в 1970 году. Первоначально эта работа была связана с созданием ускорителя, получившего название ИЛУ-6. Наряду с непрерывным совершенствованием этого ускорителя, разрабатывались другие высокочастотные ускорители – ИЛУ-6М, ИЛУ-8, ИЛУ-10, ИЛУ-11, что послужило основанием говорить о создании серии ускорителей типа ИЛУ. Головной образец первой разработанной модели ускорителя длительное время отработывался на стенде института. Первые ускорители этой серии начали поставляться промышленным предприятиям начиная с 1978 года, хотя официальная сдача ускорителя ИЛУ-6 междуведомственной комиссии состоялась двумя годами позже. Первые ускорители, поставленные в промышленность еще в конце 1970-х годов, продолжают работать в составе технологических линий до настоящего времени.

Линейные импульсные высокочастотные ускорители сразу же привлекли к себе внимание специалистов, которые по достоинству оценили чрезвычайную простоту конструкции ускоряющих структур этих ускорителей, их достаточно высокие для промышленного использования параметры (мощность, энергию и КПД), а также отсутствие в ускорителе элементов с полным высоковольтным потенциалом относительно корпуса, уход от использования в ускорителях газовой электроизоляции, относительно малые габариты и др. Импульсный характер работы этих ускорителей по-

зволяет создавать такие специфические устройства выпуска пучка электронов в атмосферу, которые в наибольшей степени соответствуют облучению изделий сложной конфигурации. В целом конструктивные и схемные решения ускорителей ИЛУ ориентированы на длительную непрерывную (круглосуточную) работу в условиях промышленного производства.

В состав технологического комплекса на основе ускорителя ИЛУ входят следующие основные элементы: собственно ускоритель (ускоряющая система, вакуумная система, устройство выпуска пучка электронов в атмосферу, ВЧ-генератор), импульсный источник питания, подпучковое технологическое оборудование и стойка управления. Ускоритель ИЛУ-8 в дополнение к этим элементам имеет еще местную биологическую защиту из стали. На рис. 1 приведены габаритные размеры основных узлов различных моделей ускорителей. Основные параметры ускорителей серии ИЛУ представлены в таблице.

**Основные параметры ускорителей серии ИЛУ**

Параметры	ИЛУ-8	ИЛУ-6	ИЛУ-6М	ИЛУ-10	ИЛУ-10М
Энергия электронов, МэВ	0,6–1,0	1,2–2,5	1,0–2,5	2,5–5,0	2,0–4,0
Средняя мощность пучка (макс.), кВт	25	20	50	50	20
Средний ток (макс.), мА	30	20	25	15	4
Потребляемая мощность, кВт	80	100	120	150	120
Масса ускорителя, т	0,6	2,2	2,2	2,9	2,5
Масса местной защиты, т	76	–	–	–	–

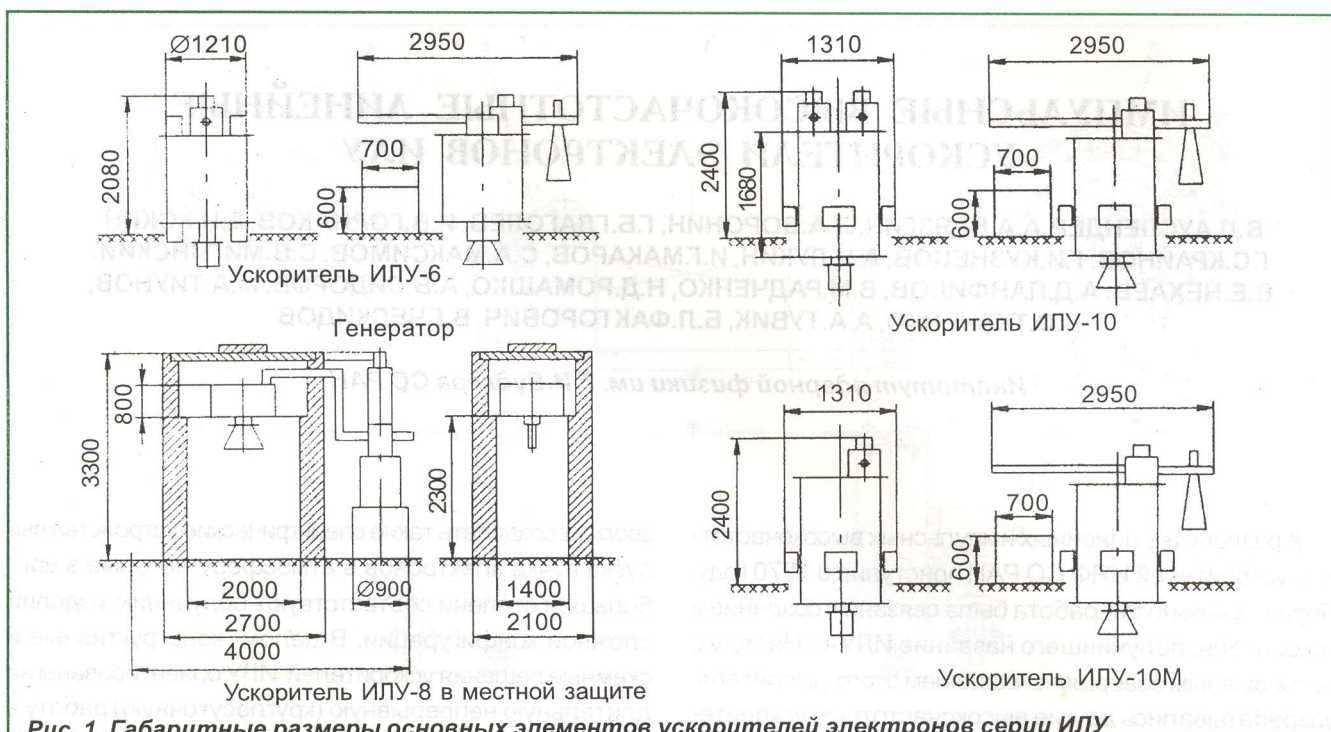


Рис. 1. Габаритные размеры основных элементов ускорителей электронов серии ИЛУ

Базовой моделью серии ускорителей ИЛУ (рис. 2) является модель ИЛУ-6. При сравнительно небольших габаритах этот ускоритель обладает достаточно высокими параметрами и может применяться во многих технологических процессах. Для его размещения достаточно защищенного помещения с внутренними размерами  $3 \times 4 \times 5 \text{ м}^3$ . При толщине стены такого помещения 1,5 м объем бетона, необходимого для строительства радиационно-защищенного помещения для размещения ускорителя, составляет около  $180 \text{ м}^3$ . Эта модель получила широкое применение как в нашей стране, так и за ее пределами.

Модель ИЛУ-6М отличается от базовой тем, что в ней используются два ВЧ-генератора. Хотя мощность ее электронного пучка в 2,5 раза больше, чем у ИЛУ-6, она имеет практически такие же габариты, как и базовая модель.

Дальнейшим развитием серии ускорителей ИЛУ стала модель ИЛУ-8, предназначенная главным образом для обработки кабелей и трубок. Малые размеры этих ускорителей позволяют размещать их в местной защите и устанавливать в обычных производственных помещениях. Местная биологическая защита выполнена в виде короба из стальных плит. Модель ИЛУ-10 (рис. 3) разработана в целях повышения энергии электронов до 5 МэВ. Габариты этого

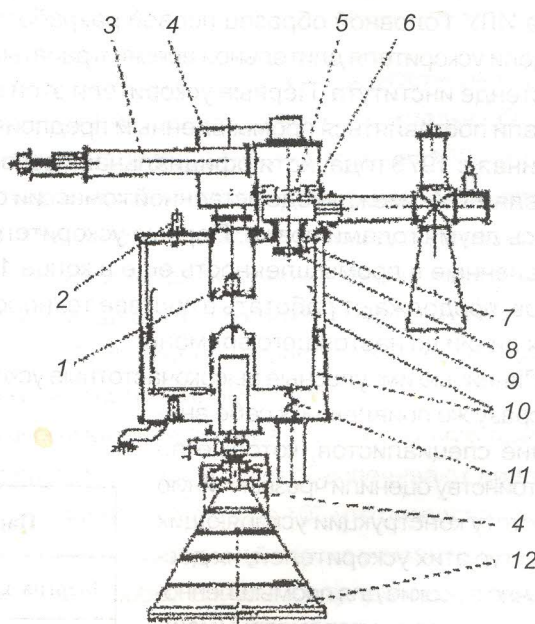
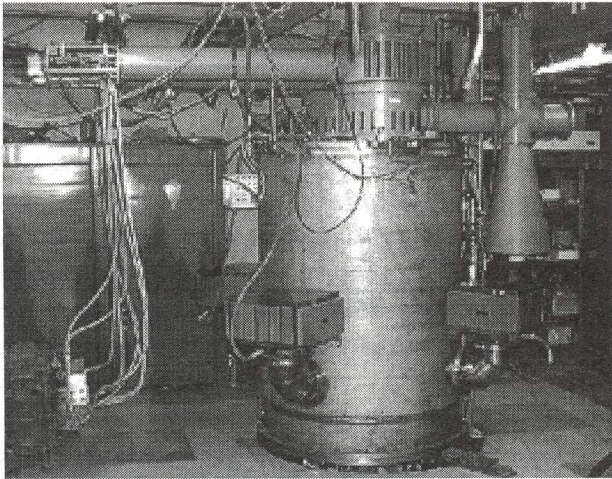


Рис. 2. Ускоритель ИЛУ-6 (поперечное сечение): 1 – инжектор электронов; 2 – измерительная петля; 3 – катодный шлейф; 4 – магнитоэлектрические насосы; 5 – лампа генератора; 6 – подвижная пластина конденсатора обратной связи; 7 – опора петли связи; 8 – вакуумный конденсатор петли связи; 9 – вакуумный объем; 10 – резонатор; 11 – ввод напряжения смещения нижней половины резонатора; 12 – выпускное устройство



**Рис. 3. Ускоритель электронов ИЛУ-10 на стенде ИЯФ (видны бак резонатора, магниторазрядные насосы и ВЧ-генераторы)**

ускорителя не намного превышают габариты ИЛУ-6 (его высота лишь на 320 мм больше, чем у ИЛУ-6). Для осуществления процессов, требующих повышенной мощности, на ускорителе устанавливаются (как и на ускорителе ИЛУ-6М) два ВЧ-генератора. Наряду с возможностью использования любых ранее разработанных устройств для выпуска пучка электронов в атмосферу, в данном ускорителе впервые была предусмотрена трансформация электронного пучка в тормозное рентгеновское излучение на внутренней мишени без выпуска ускоренных электронов из вакуума в атмосферу.

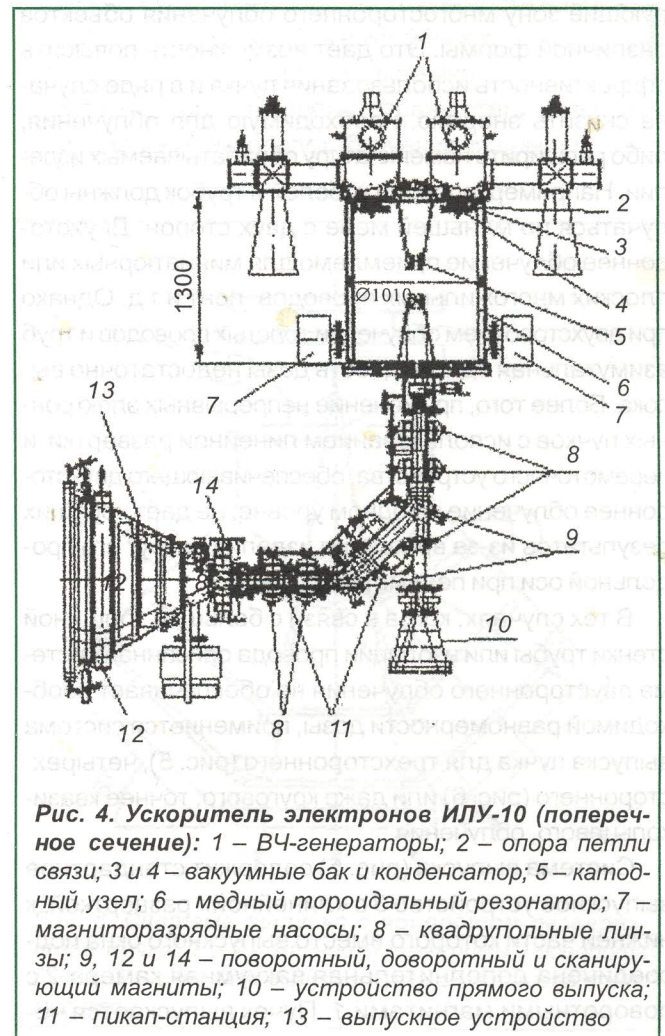
Опыт разработки и эксплуатации импульсных высокочастотных ускорителей типа ИЛУ (ИЛУ-6, ИЛУ-8, ИЛУ-10) показал, что однорезонаторные ускорители (с одним ускоряющим зазором) могут эффективно использоваться для ускорения электронов до получения энергии приблизительно 5 МэВ. Дальнейшее повышение энергии электронного пучка возможно лишь при использовании многозазорных ускоряющих структур, например цепочек связанных резонаторов.

Познакомимся несколько подробнее с конструкцией импульсных высокочастотных ускорителей на базе ускорителя ИЛУ-10 (рис. 4). Основой конструкции ускорителя является медный тороидальный резонатор (рабочая частота 116 МГц) с конусообразными осевыми выступами, пространство между которыми образует ускоряющий зазор длиной 270 мм.

Резонатор помещен в вакуумный бак 3. На верхнем электроде смонтирован катодно-сеточный узел 5,

являющийся инжектором электронов. Нижний электрод и инжектор образуют триодную ускоряющую систему. Управление током ускоренного пучка электронов осуществляется изменением величины положительного смещения на катоде относительно сетки. Под нижним электродом резонатора установлена магнитная линза, формирующая электронный пучок в выпускном тракте ускорителя.

Два однокаскадных автогенератора 1 высокой частоты, выполненные на триодах типа ГИ-50А, установлены непосредственно на вакуумном баке. Эти генераторы, собранные по схеме с общей сеткой, работают в режиме самовозбуждения на частоте, близкой к собственной частоте резонатора. Связь анодных контуров с резонатором осуществляется индуктивными петлями. Величина связи с резонатором определяется площадью петли и настройкой собственно анодных контуров относительно частоты резонатора.



**Рис. 4. Ускоритель электронов ИЛУ-10 (поперечное сечение): 1 – ВЧ-генераторы; 2 – опора петли связи; 3 и 4 – вакуумные бак и конденсатор; 5 – катодный узел; 6 – медный тороидальный резонатор; 7 – магниторазрядные насосы; 8 – квадрупольные линзы; 9, 12 и 14 – поворотный, доворотный и сканирующий магниты; 10 – устройство прямого выпуска; 11 – пикап-станция; 13 – выпускное устройство**

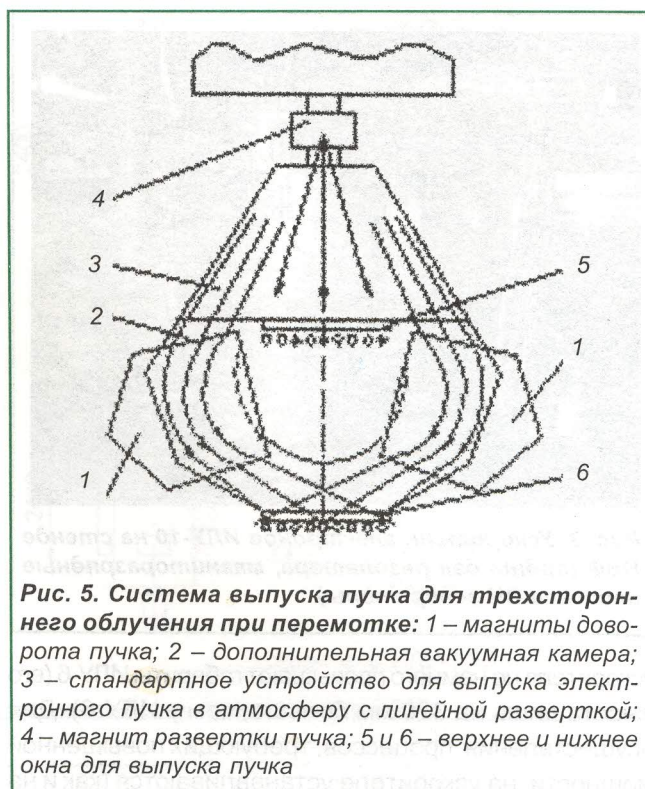
На верхнем фланце бака установлена измерительная петля. Сигнал с нее, пропорциональный напряжению на зазоре резонатора, используется для измерения энергии ускоренных электронов.

Резонатор помещен в вакуумный бак из коррозионно-стойкой стали. Откачка из этого бака осуществляется четырьмя магниторазрядными насосами. Предварительно для этого используется форвакуумный агрегат. Все уплотнения в вакуумном объеме металлические (медь, индий). Рабочий вакуум  $\sim 10^{-7}$  Торр. При нормальной эксплуатации вакуумной системы (перерывы в работе продолжительностью до двух суток) не требуется форвакуумной откачки для старта магниторазрядных насосов. Давление в вакуумном баке контролируется по величине тока в магниторазрядных насосах.

Использование для промышленных технологий импульсных ускорителей электронов позволяет создавать устройства выпуска электронного пучка, формирующие зону многостороннего облучения объектов различной формы. Это дает возможность повысить эффективность использования пучка и в ряде случаев снизить энергию, необходимую для облучения, либо расширить номенклатуру обрабатываемых изделий. Например, провода кабелей и трубок должны облучаться по меньшей мере с двух сторон. Двухстороннее облучение приемлемо для миниатюрных или плоских многожильных проводов, лент и т.д. Однако при двухстороннем облучении толстых проводов и трубок азимутальная однородность дозы недостаточно высока. Более того, применение непрерывных электронных пучков с использованием линейной развертки и перемоточного устройства, обеспечивающего двухстороннее облучение на одном уровне, не дает хороших результатов из-за вращения изделия вокруг его продольной оси при перемотке.

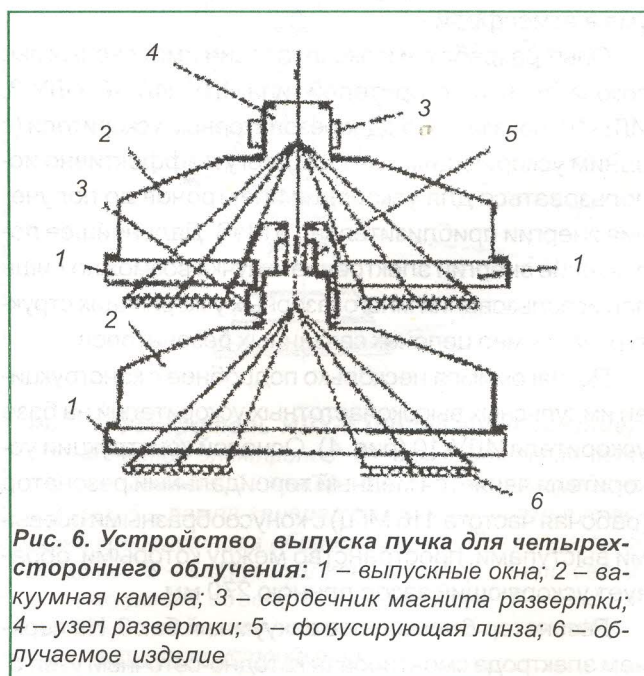
В тех случаях, когда в связи с большой толщиной стенки трубы или изоляции провода описанная система двустороннего облучения не обеспечивает необходимой равномерности дозы, применяется система выпуска пучка для трехстороннего (рис. 5), четырехстороннего (рис. 6) или даже кругового, точнее квази-кольцевого, облучения.

Система выпуска (рис. 5) содержит стандартное выпускное устройство 3 с «линейной» разверткой, к нижней части которого вместо выпускного окна подсоединена дополнительная вакуумная камера 2 с поворотными магнитами 1. Пучок выпускается че-



**Рис. 5. Система выпуска пучка для трехстороннего облучения при перемотке:** 1 – магниты доворота пучка; 2 – дополнительная вакуумная камера; 3 – стандартное устройство для выпуска электронного пучка в атмосферу с линейной разверткой; 4 – магнит развертки пучка; 5 и 6 – верхнее и нижнее окна для выпуска пучка

рез два окна: верхнее 5 и нижнее 6. Геометрия системы подобрана таким образом, что средний угол между плоскостью окна 6 и пучком (как правым, так и левым) близок к  $30^\circ$ . Так как через верхнее выпускное окно облучается наружная часть «петли» облу-



**Рис. 6. Устройство выпуска пучка для четырехстороннего облучения:** 1 – выпускные окна; 2 – вакуумная камера; 3 – сердечник магнита развертки; 4 – узел развертки; 5 – фокусирующая линза; 6 – облучаемое изделие



чаемого изделия, а через нижнее – внутренняя с воздействием на нее двух пучков под углом  $30^\circ$ , то устройство в целом обеспечивает трехстороннее облучение.

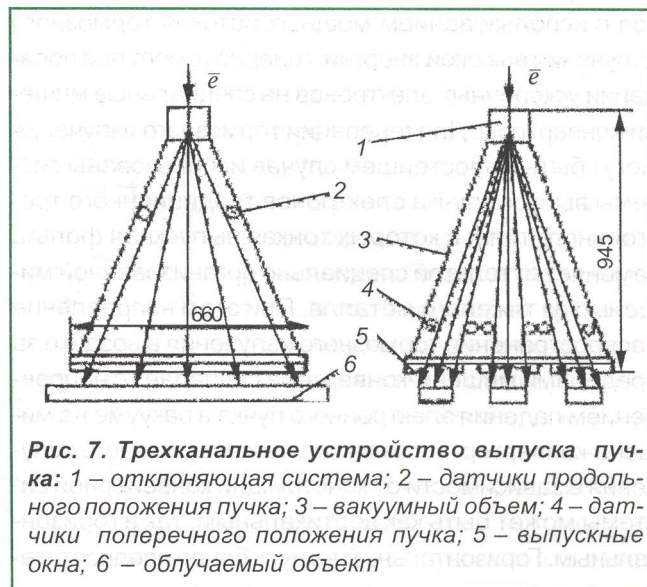
Удобной для радиационной обработки проводов и труб является система облучения, состоящая из устройства перемотки облучаемого изделия на четырех барабанах и устройства выпуска электронного пучка с четырьмя выпускными окнами. В этой системе отсутствует изменение направления изгиба изделия при перемотке, и оно облучается на двух уровнях как минимум с двух сторон.

Такое устройство выпуска электронного пучка показано на рис. 6. Пучок отклоняется на  $45^\circ$  и последовательно направляется по каждому импульсу тока пучка в одно из четырех выпускных окон, что обеспечивает четырехстороннее облучение при перемотке. Данная система облучения гарантирует такую высокую степень азимутальной однородности облучения, которая фактически исключает необходимость создания специальной круговой системы электронно-лучевой обработки изделий. Расчеты показывают, что при четырехстороннем облучении азимутальная неоднородность облучения провода с изоляцией толщиной 1–1,5 мм при сечении токопроводящей жилы 1–150 мм<sup>2</sup> не превышает  $\pm 5\%$ . Такая система выпуска достаточно универсальна и позволяет реализовать двух- или четырехстороннее облучение или линейную развертку пучка простым переключением режима работы разворачивающих магнитов.

Для специальных целей была разработана трехканальная система выпуска пучка с линейной разверткой его в каждом канале (рис. 7). С помощью этой системы обрабатывались изделия на трех отдельных линиях одновременно с различными режимами облучения.

На рис. 8 представлена система выпуска с поворотом развернутого пучка электронов, которая используется для изготовления крупногабаритных емкостей (типа газгольдеров) из радиационно-отверждаемых компаундов. В этой установке ускоритель перемещается по двум координатам (вертикали и горизонтали) над вращающейся емкостью в процессе ее изготовления. Система выпуска обеспечивает возможность облучения как цилиндрической части емкости, так и ее торцов эллиптической формы.

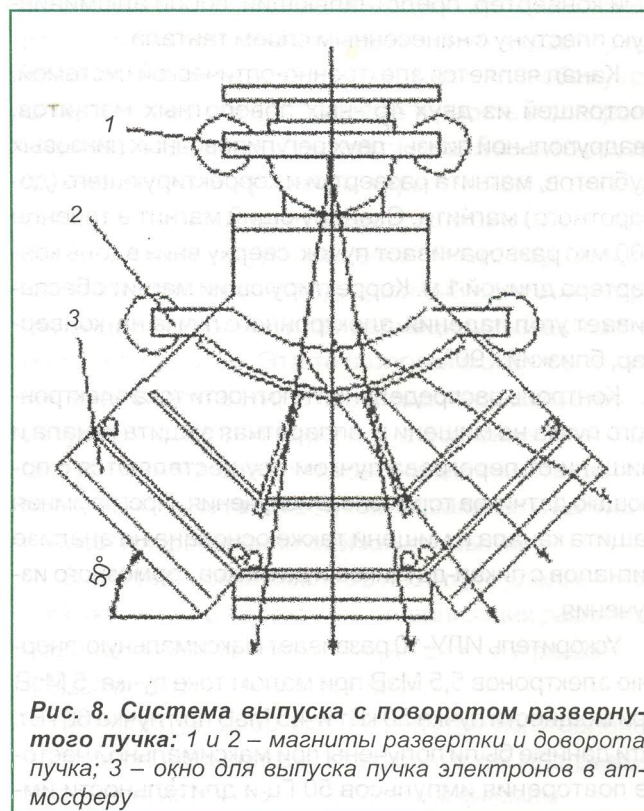
Любой из ускорителей типа ИЛУ может быть оснащен как выпускным устройством с линейной разверт-



**Рис. 7. Трехканальное устройство выпуска пучка:** 1 – отклоняющая система; 2 – датчики продольного положения пучка; 3 – вакуумный объем; 4 – датчики поперечного положения пучка; 5 – выпускные окна; 6 – облучаемый объект

кой пучка (см. рис. 2), так и любым из упомянутых выпускных устройств. При необходимости возможна разработка и других типов выпускных устройств, приспособленных к технологии заказчика.

В последние годы многие страны стали развивать радиационные технологии облучения пищевых продук-



**Рис. 8. Система выпуска с поворотом развернутого пучка:** 1 и 2 – магниты развертки и доворота пучка; 3 – окно для выпуска пучка электронов в атмосферу

тов с использованием мощных потоков тормозного излучения высокой энергии, генерируемого при попадании ускоренных электронов на специальные мишени-конвертеры. Для генерации тормозного излучения могут быть в простейшем случае использованы системы выпуска пучка электронов традиционного треугольного типа, в которых тонкая выпускная фольга заменяется толстой специально организованной мишенью из тяжелого металла. При этом направление распространения тормозного излучения в воздухе за пределами мишени-конвертера совпадает с направлением падения электронного пучка в вакууме на мишень-конвертер. Тогда выход пучка тормозного излучения в зависимости от конструкции конвейерной системы может быть как вертикальным, так и горизонтальным. Горизонтальный выпуск более предпочтителен с точки зрения упрощения конструкции конвейерной системы, но он более сложен для ускорителя типа ИЛУ, так как при этом необходимо в выпускном тракте повернуть электронный пучок на  $90^\circ$ , что усложняет систему выпуска.

Общий вид такой системы поворота электронного пучка показан на рис. 8. Пучок, выходя из ускорителя, попадает в поворотный канал, где поворачивается на  $90^\circ$  и сбрасывается на вертикально расположенный конвертер, представляющий собой алюминиевую пластину с нанесенным слоем тантала.

Канал является электронно-оптической системой, состоящей из двух  $45^\circ$ -ных поворотных магнитов, квадрупольной линзы, двух регулировочных линзовых дублетов, магнита развертки и корректирующего (дворотного) магнита. Сканирующий магнит в течение 500 мкс разворачивает пучок сверху вниз вдоль конвертера длиной 1 м. Корректирующий магнит обеспечивает угол падения электронного пучка на конвертер, близкий к  $90^\circ$ .

Контроль распределения плотности тока электронного пучка на мишени и аппаратная защита канала и мишени от перегрева пучком осуществляются с помощью датчиков тормозного излучения. Программная защита канала и мишени также основана на анализе сигналов с пикап-датчиков и датчиков тормозного излучения.

Ускоритель ИЛУ-10 развивает максимальную энергию электронов 5,5 МэВ при малом токе пучка: 5 МэВ при мощности пучка 50 кВт и 4,5 МэВ при пучке 60 кВт. Эти данные были получены при максимальной частоте повторения импульсов 50 Гц и длительности им-

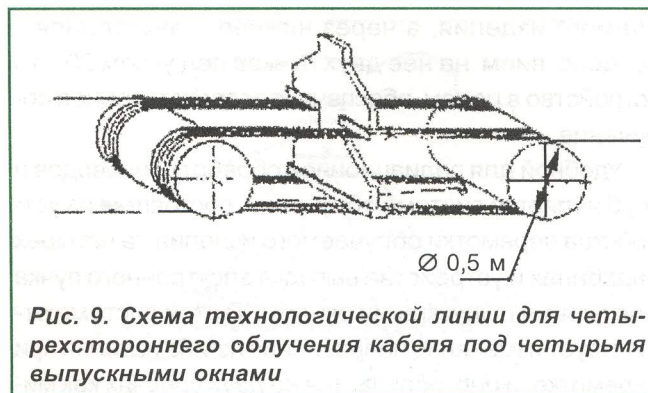


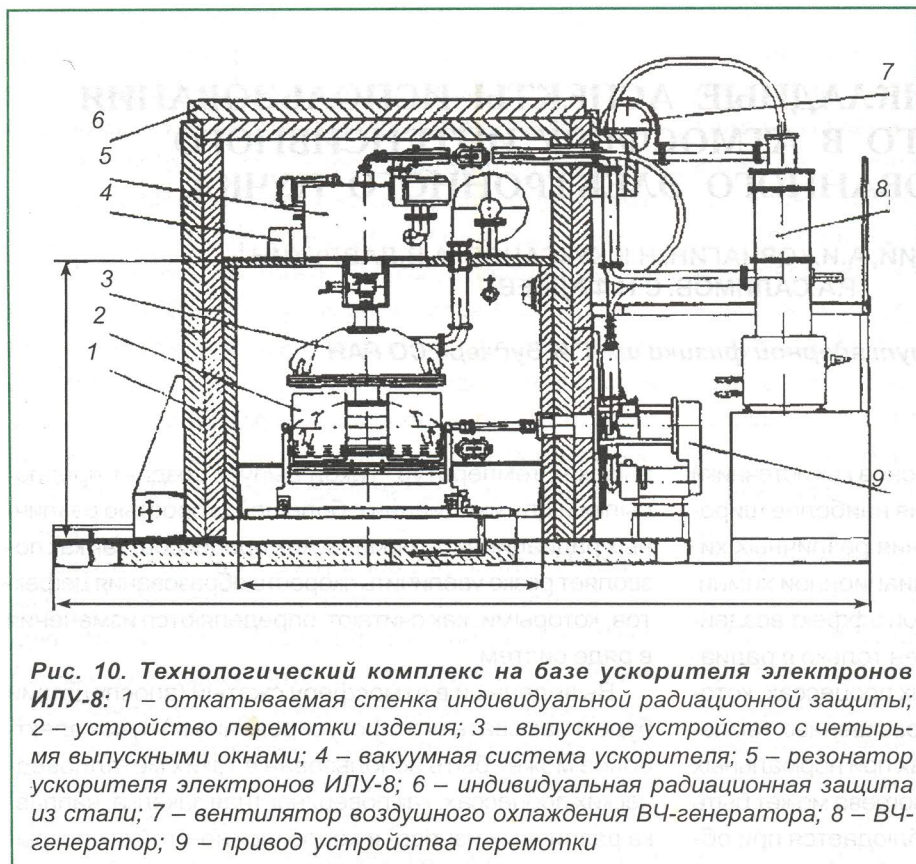
Рис. 9. Схема технологической линии для четырехстороннего облучения кабеля под четырьмя выпускными окнами

пульсов 400–500 мкс. При работе с конвертером из титана на ширине развертки 60 см среднее значение дозы тормозного излучения, создаваемой ускорителем на поверхности облучаемого материала при однократном прохождении зоны облучения и скорости конвейера 1 мм/с, составляет приблизительно 18 кГр.

Эффективное применение ускорителей семейства ИЛУ в промышленных процессах облучения электронами кабелей, проводов и труб обеспечивается с помощью способа четырехстороннего облучения, суть которого поясняет рис. 10. Ускоренные электроны выпускаются к облучаемому изделию с помощью устройства с четырьмя окнами. Изделие в процессе облучения перематывается устройством с четырьмя барабанами диаметром 480, 650 или 1500 мм (в зависимости от жесткости и диаметра облучаемого изделия).

Ускоритель ИЛУ-8 поставляется заказчикам в составе промышленного радиационно-технологического комплекса по облучению длиномерных изделий (пластиковые трубки, провода, кабели, нити, шнур и т.п.). В его состав, наряду с ускорителем и его системами, входят система перемотки изделий и местная биологическая защита. Поперечное сечение одного из таких комплексов показано на рис. 10. Комплекс снабжен системой четырехстороннего облучения, что позволяет при энергии электронов до 1 МэВ обрабатывать кабель с толщиной изоляции до 2 мм и полиэтиленовую трубку с толщиной стенки до 2,5 мм. Производительность комплекса при облучении термоусаживаемых труб составляет более 200 м/мин, провода с изоляцией из ПЭ – также более 200 м/мин, провода с изоляцией из ПВХ – выше 300 м/мин.

Установка на базе ускорителя ИЛУ-6 с энергией электронов до 2,5 МэВ способна обрабатывать кабе-



**Рис. 10. Технологический комплекс на базе ускорителя электронов ИЛУ-8:** 1 – откатываемая стенка индивидуальной радиационной защиты; 2 – устройство перемотки изделия; 3 – выпускное устройство с четырьмя выпускными окнами; 4 – вакуумная система ускорителя; 5 – резонатор ускорителя электронов ИЛУ-8; 6 – индивидуальная радиационная защита из стали; 7 – вентилятор воздушного охлаждения ВЧ-генератора; 8 – ВЧ-генератор; 9 – привод устройства перемотки

ли с изоляцией толщиной до 5 мм и полиэтиленовые трубы горячего водоснабжения, ламинированные алюминием. В Китае такая установка используется для облучения кабеля с изоляцией на напряжение 10 кВ (производительность до 100 м/мин).

Ускорители ИЛУ-6 и ИЛУ-10 можно эффективно применять в установках для радиационной стерилизации медицинских изделий и медпрепаратов. В г. Ижевске и г. Киеве работают установки на базе ускорителей ИЛУ-6 по стерилизации одноразовых шприцев. Производительность такой специализированной установки, применяемой в Ижевске, составляет 90–100 тыс. шприцев в час. На основе указанных ускорителей возможно создание как многоцелевых центров облучения, так и межрегиональных облучательных центров, в которых, наряду с работами по стерилизации, может выполняться также облучение различных полимерных изделий. Область применения ускорителей типа ИЛУ-10 с энергией электронов до 5 МэВ значительно шире, чем ускорителей с более низкой энергией. В ряде стран на основе такого рода ускорителей создаются технологические комплексы по радиацион-

ному обеззараживанию мяса птицы, рыбы и других продуктов. Такие комплексы создаются за рубежом и на базе ускорителя ИЛУ-10.

В Институте ядерной физики совместно с другими организациями разработан ряд перспективных технологических процессов на основе использования ускорителей серии ИЛУ, которые могут найти применение в промышленности и медицине. Примером могут служить радиационно-термические процессы. Пучок электронов, выпущенный в воздух через фольгу, способен обеспечить плотность мощности до 400–500 Вт/см<sup>2</sup>, что позволяет нагревать обрабатываемый материал до ~2000 °С. При этом материал нагревается во всем объеме проникновения электронов, что практически исключает тепловую инерцию, неизбежную при других способах нагрева.

Возможность тонкого управления параметрами пучка позволяет нагревать вещества по любому графику, что гарантирует высокую точность и воспроизводимость процесса. Эффект пучковой ионизации, добавляющийся к эффектам термической активации реакции, увеличивает скорость реакции и позволяет снизить температуру процесса. Таким образом, пучок выступает как нетрадиционный источник нагрева, с одной стороны, и как радиационный активатор реакции, с другой. Эта технология может быть применена, в частности, в производстве высокотемпературных стекол и керамик, высококачественных ферритных материалов, для повышения твердости поверхности металлов путем их закалки и наплавки износо- и коррозионно-стойких покрытий.

Значительное внимание в институте уделяется отработке на стендах режимов стерилизации различных медицинских изделий и медпрепаратов и разработке новых лекарственных композиций.

В период до 2000 года институтом изготовлено и поставлено заказчикам 35 ускорителей ИЛУ различных типов, из них 14 – зарубежным фирмам.

## НЕКОТОРЫЕ ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫВЕДЕННОГО В АТМОСФЕРУ ИНТЕНСИВНОГО СФОКУСИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

М.Г.ГОЛКОВСКИЙ, А.И.КОРЧАГИН, Н.К.КУКСАНОВ, А.В.ЛАВРУХИН,  
Р.А.САЛИМОВ, С.Н.ФАДЕЕВ

*Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН*

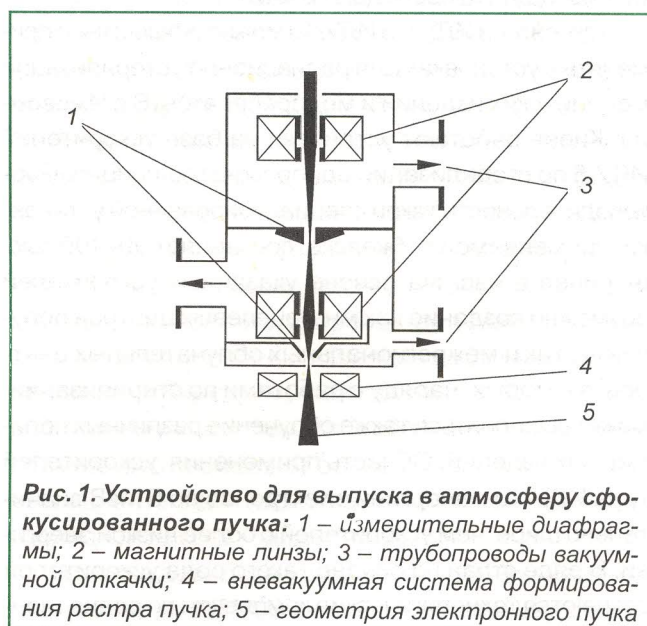
Традиционно ускорители электронов как источники мощного ионизирующего излучения наиболее широко используются для инициирования различных химических реакций в процессах радиационной химии. Побочный в этих процессах тепловой эффект воздействия излучения на вещество важен только в радиационно-термических твердофазных процессах, которые заметно протекают лишь при повышенных температурах. В радиационных процессах при нормальных условиях этот побочный эффект разогрева может быть даже вреден, как это зачастую наблюдается при облучении полимеров. Между тем термическое воздействие, зависящее от плотности потока тепловой энергии, может быть полезным и самостоятельным процессом в ряде систем.

При выводе пучка электронов из ускорителя в атмосферу из-за ограничений, связанных с разогревом фольги, плотность тока на ней обычно не превышает  $100 \text{ мкА/см}^2$ , при которой на поверхности облучаемого материала при энергии электронов  $2 \text{ МэВ}$  создается тепловой поток  $\sim 200 \text{ Вт/см}^2$ . Это довольно большой поток, в других единицах измерения составляющий  $\sim 1,7 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$ . Он используется во многих технических приложениях, хотя и недостаточен для осуществления ряда высокотемпературных процессов.

Если же интенсивный пучок электронов вывести из ускорителя не через фольгу, а через отверстие малого ( $\sim 1 \text{ мм}$ ) диаметра, то такой пучок электронов может создать поток тепловой энергии в 100 тыс. раз больший, чем при выпуске через фольгу и мощности пучка  $100 \text{ кВт}$ . Естественно, что такой выпуск пучка электронов в атмосферу создает и более заметный термический эффект, проявляющийся в значительно более быстром разогреве материала и достижении

высоких температур. Такой выпуск создает предпосылки и для инициации с большей скоростью различных радиационно-термических процессов, так как позволяет резко увеличить скорость образования дефектов, которыми, как считают, определяются изменения в ряде систем.

Выведенный в атмосферу сжатый (впоследствии будем называть его сфокусированным) пучок электронов может быть использован в таких металлургических процессах, как поверхностная закалка, наплавка различных износо- и коррозионно-стойких покрытий и др. Следует отметить, что выведенный в атмосферу через отверстие малого диаметра пучок электронов может быть оперативно управляемым по интенсивности и по положению. К тому же этот пучок обеспечивает объемный ввод энергии в облучаемый мате-



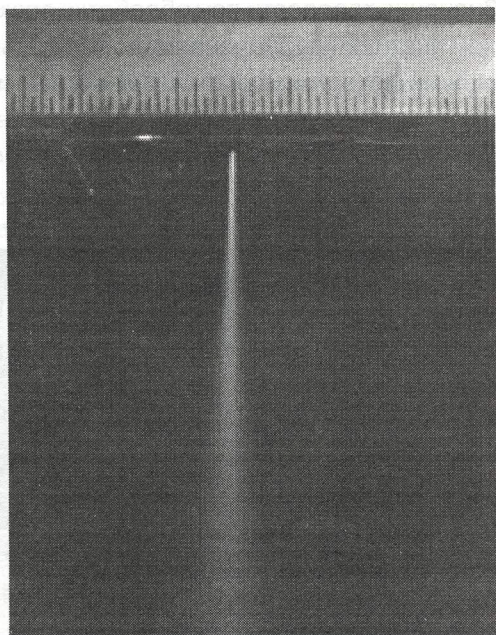
риал, хотя и на небольшую глубину, но все же достаточную для ряда технических применений.

Для вывода в атмосферу пучка с малым поперечным размером в ИЯФ было разработано специальное устройство. Таким устройством оборудуются ускорители серии ЭЛВ с максимальной мощностью до 100 кВт. Плотность тока электронного пучка на выходе из этих устройств может достигать  $10 \text{ А/см}^2$ , а плотность мощности  $-10 \text{ МВт/см}^2$ . Пучок выводится в атмосферу (или иную газовую среду высокого давления) через систему отверстий в диафрагмах (диаметр отверстий 1–2 мм). Рабочий вакуум в ускорительной трубке обеспечивается откачкой поступающего газа непрерывно работающими насосами системы дифференциальной откачки.

Схематично такое выпускное устройство показано на рис. 1. Суть работы устройства заключается в следующем. После выхода из трубки ускорителя электронный пучок фокусируется верхней магнитной линзой. В месте минимального поперечного размера пучка (кроссовере этой линзы) расположена диафрагма. Далее пучок проходит через вторую линзу с меньшим фокусным расстоянием. В кроссовере нижней линзы расположены две диафрагмы. Газ поступает через отверстия в диафрагмах намного медленнее скоро-

сти откачки вакуумных насосов. Благодаря этому обеспечивается необходимый перепад давления. Максимальная величина выводимого тока пучка ограничивается пульсациями ускоряющего напряжения, приводящими к увеличению отверстий в диафрагмах, и составляет 100 мА.

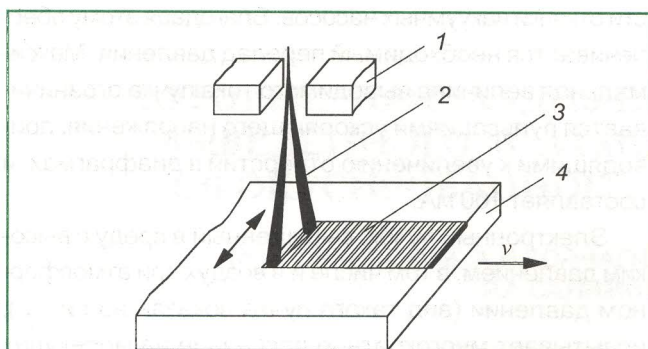
Электронный пучок, выпущенный в среду с высоким давлением, в том числе и в воздух при атмосферном давлении (вид такого пучка показан на рис. 2), испытывает многократное рассеяние на молекулах газа. В результате по мере удаления от выпускного устройства поперечный размер пучка увеличивается, а плотность мощности падает. Чем выше энергия выведенных в газовую среду электронов, тем меньше угол многократного рассеяния. Соответственно при прохождении одинакового расстояния с ростом энергии электронов уменьшается размер пучка и растет его плотность мощности. По этой причине для выведенных в атмосферу пучков ускоренных электронов с энергией 100–300 кэВ высокотемпературная обработка материалов может осуществляться на расстоянии не более 3–5 см от выпускного устройства. Кроме того, для уменьшения рассеяния пучок выводится в легкие газы (как правило, гелий). Для этих целей желательно использовать высоковольтные ускорители с энергией 1000–1500 кэВ, поскольку материалы можно обрабатывать на расстоянии 20–40 см. При этом становится возможным вместо схемы, при которой пучок неподвижен, а обрабатываемый объект перемещается инерционным двух- и трехкоординатным манипулятором, использовать дешевый однокоординатный манипулятор, а в пространстве перемещать пучок электронов. Для этой цели устройство оборудовано электромагнитами сканирования в двух перпендикулярных направлениях, при этом пучок отклоняется непосредственно в воздухе (или иной газовой среде). Система сканирования позволяет сформировать любую конфигурацию и дозу поля в соответствии с требованиями технологии.



**Рис. 2. Сфокусированный электронный пучок, выведенный в атмосферу**

### **ЗАКАЛКА С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА**

Выведенный в атмосферу сфокусированный электронный пучок, генерируемый промышленными ускорителями электронов серии ЭЛВ, позволяет выполнять поверхностную закалку стальных изделий разной фор-



**Рис. 3. Схема закалки электронным пучком плоских деталей:** 1 – электромагниты сканирования пучка; 2 – траектория сканирования пучка; 3 – закаленная полоса; 4 – закаливаемая деталь

мы, а также наплавку различных материалов на плоские поверхности черных и цветных металлов.

Эффективная глубина проникновения в металл ускоренных электронов в диапазоне энергий 1–1,5 МэВ часто сопоставима с требуемой глубиной закаленного слоя. Возможности пучка таковы, что, например, при максимальной концентрации вводимой мощности (диаметр пучка 1 мм, мощность 100 кВт) поверхностный слой стальной детали может быть прогрет до температуры плавления на глубину 0,4 мм за время  $6 \cdot 10^{-5}$  с.

Использование устройств, обеспечивающих сканирование электронным пучком в воздухе, позволяет значительно увеличить площади обрабатываемых изделий и повысить производительность процесса.

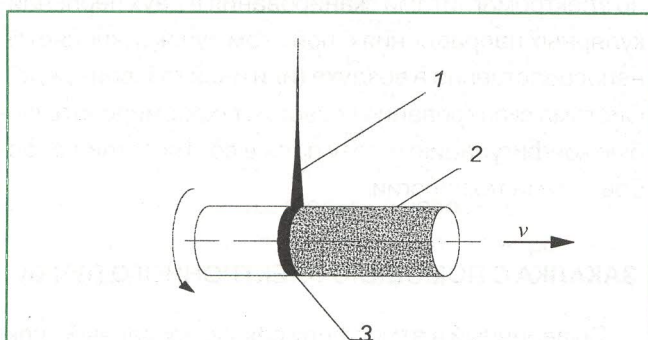
Закалке без использования охлаждающих жидкостей (за счет явления самозакалки) могут подвергать-

ся как плоские, так и цилиндрические стальные изделия. Этот процесс обладает высокой эффективностью и производительностью. После обработки сохраняется высокое качество закаленного поверхностного слоя. В большинстве случаев класс чистоты поверхности в результате закалки не изменяется и, следовательно, данная операция может быть финишной.

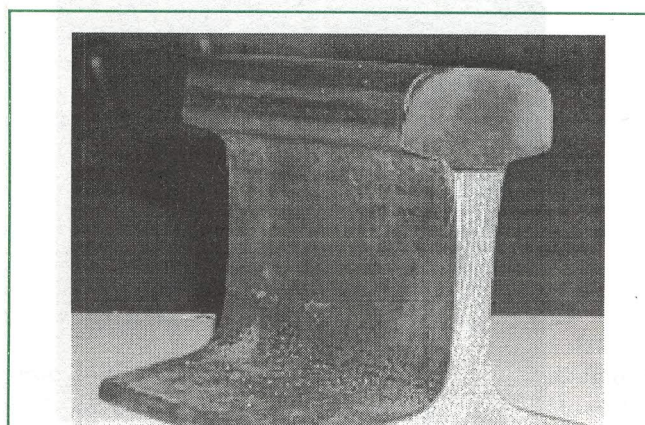
Схема закалки плоских изделий показана на рис. 3. Сканирующий электронный пучок оставляет закаленную полосу на детали, перемещающейся со скоростью  $v$  перпендикулярно к направлению сканирования. Ширина полосы, закаленной за один проход, может достигать 25 см.

Схема закалки цилиндрических изделий показана на рис. 4. Быстро вращающаяся цилиндрическая деталь поступательно перемещается под пучком вдоль оси вращения со скоростью  $v$ . В результате на поверхности детали формируется прогретая зона в форме пояса, перемещающегося вдоль цилиндра со скоростью  $v$ . Поверхностный слой быстро нагревается пучком, а затем быстро охлаждается за счет оттока тепла в глубь материала. Спиральная дорожка наносится электронным пучком на цилиндрическую поверхность образца так, чтобы на поверхности образовался сплошной слой, сформированный за счет перекрытия соседних дорожек. В результате электронно-лучевой закалки образуется однородный упрочненный слой.

Значения твердости при обработке электронным пучком аналогичны значениям, достигаемым традиционными методами закалки. Вместе с тем при концентрации углерода в образце, близкой к эвтектидной, твердость закаленной зоны может составлять



**Рис. 4. Схема закалки электронным пучком цилиндрических деталей:** 1 – рассеивающийся в воздухе электронный пучок; 2 – закаленный слой; 3 – кольцо разогрева



**Рис. 5. Закалка боковой поверхности рельсов с помощью пучка электронов**

11 ГПа, что несколько выше значений, достигаемых обычной объемной закалкой.

Поверхностный слой в процессе закалки цилиндрических образцов электронным пучком охлаждается в две стадии: на первой – тепло за счет теплопроводности быстро распространяется в глубь материала; на второй – температура медленно понижается до точки конца мартенситного превращения. Обработанные пучком изделия имеют закаленный слой, отличающийся высокими прочностными свойствами. Предел выносливости стали, обработанной электронным пучком, на 35% выше, чем сталей, закаленных традиционными способами.

Глубина мартенситной зоны, полученной путем обработки материала ЭП, может быть еще более увеличена за счет использования легированных сталей с повышенной прокаливаемостью. Мартенситная зона в них шире, так как является промежуточной зоной между закаленным слоем и основным материалом. Этим объясняется резкий переход по твердости между упрочненным слоем и исходным материалом.

К преимуществам закалки электронным пучком нужно отнести отсутствие дополнительных охлаждающих жидкостей, высокую эффективность и производительность процесса (до 200 см<sup>2</sup>/с). Закалке могут подвергаться изделия с широким диапазоном размеров. Для плоских изделий практически единственным ограничением является толщина, которая должна быть не менее 5 мм. Это связано с тем, что для оттока тепла от закаливаемой зоны необходим слой материала достаточной массы. Для закалки допускаются цилиндрические изделия диаметром 8–750 мм. Высокая скорость обуславливает высокую твердость закаленного слоя, практически сохраняя исходный класс чистоты поверхности. Стабильность проведения процесса в сочетании с высокой скоростью обеспечивает минимальные поводки деталей.

На рис. 5 в качестве иллюстрации возможностей такого рода закалки показан образец, вырезанный из железнодорожного рельса. Закалка внутренней поверхности рельсов (особенно при установке на криволинейных участках) позволяет в несколько раз уменьшить износ их поверхности, а следовательно, увеличить сроки замены. Только электронно-лучевая закалка позволяет получить качественное поверхностное упрочнение боковой поверхности головки рельса (особенно при условии закалки рельсов в действующем пути).



**Рис. 6. Наплавка электронным пучком борида титана**

#### **НАПЛАВКА МОДИФИЦИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ**

Модифицирующие покрытия наносятся на черные и цветные металлы по той же схеме, что и закалка плоских изделий (см. рис. 3), лишь с тем отличием, что на поверхность детали предварительно помещаются модифицирующие порошки. На разнообразные детали можно наносить покрытия, обладающие повышенной твердостью, химической, износ-, коррозионно- и термостойкостью (либо сочетанием этих качеств). Для наплавки возможно использовать разнообразные порошковые материалы с флюсующими добавками (карбиды, бориды, нитриды, коррозионно-стойкая сталь, интерметаллиды), а также самофлюсующиеся наплавочные порошки.

Покрытия наносятся на основы из стали, меди и медных сплавов, титана и его сплавов, алюминия и его сплавов. Глубина проплавления за один проход может варьироваться в пределах 0,5–5 мм. Оптимальной по физико-химическим свойствам является толщина проплавленного слоя 1–2 мм. Твердость покрытий достигает 800 кг/мм<sup>2</sup> по Виккерсу и может быть увеличена до 1000 кг/мм<sup>2</sup> в результате последующей термической обработки. Возможно нанесение многослойных покрытий. Производительность наплавки концентрированным электронным пучком достигает 10 м<sup>2</sup>/ч или более 150 кг/ч наплавленного металла. Толщина основы для меди и алюминия должна быть не менее 9 мм, для остальных материалов – не менее 5 мм. Потери порошка (в целом незначительные) за-

висят от вида наплавляемого порошка и материала основы и составляют 5–40%. Преимущество электронно-лучевой наплавки по сравнению с традиционными методами заключается в том, что энергия пучка электронов выделяется лишь в слое порошка и основы на глубине, сопоставимой с требуемой толщиной наплавляемого слоя. При этом вследствие малого времени нагрева материала до требуемой температуры и времени контакта расплава с атмосферой окисление наплавляемых компонентов и основы незначительно.

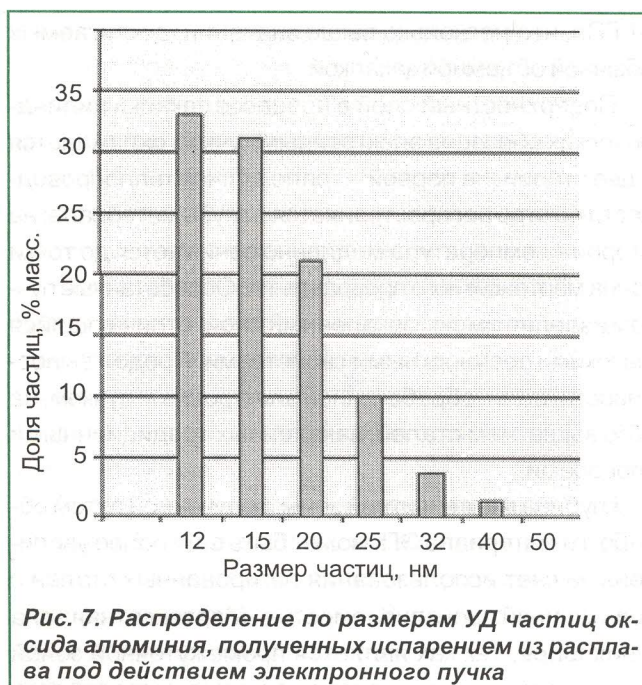
Износостойкие покрытия могут быть нанесены и на любые габаритные изделия, в том числе на медные плиты кристаллизаторов установок непрерывной разливки стали.

На рис. 6 показана поверхность, образующаяся при наплавке борида титана на титановую подложку.

## ПОЛУЧЕНИЕ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В настоящее время повсеместно возрастает интерес к использованию ультрадисперсных порошков (УДП) в промышленном производстве. Это достаточно быстрый путь для повышения производительности технологических процессов и повышения качества продукции. Только применение УДП позволяет обеспечить значительный рост качества при производстве многокомпонентной керамики, металлокерамики, катализаторов, сорбентов, пигментов, селективных газопоглотителей, присадок к смазочным маслам, магнитных жидкостей и носителей записи информации (в том числе кредитных карточек), модификаторов порошковых сплавов, абразивных порошков, носителей лекарственных форм и т.д. Сдерживающим фактором для широкого использования УД систем являются традиционные способы их получения: механо- и плазмохимический, золь-гель метод. Каждому из перечисленных методов присущи свои недостатки: они или малопродуктивны, или позволяют получать УДП со слишком широким дисперсионным распределением и большим содержанием частиц микронного размера, что значительно снижает качество конечного продукта или загрязняет порошки материалами измельчающих конструкций.

В ИЯФ СО РАН разработан и реализован высокопроизводительный способ получения нанопорошков металлов, их оксидов, а также оксида кремния путем их испарения из расплава. Необходимая для испарения высокая плотность мощности обеспечивается использованием в качестве теплового источника стан-



*Рис. 7. Распределение по размерам УД частиц оксида алюминия, полученных испарением из расплава под действием электронного пучка*

дартного ускорителя серии ЭЛВ с выпуском в атмосферу сфокусированного пучка электронов. Максимальную плотность мощности на поверхности испаряемого материала можно довести до десятков кВт/см<sup>2</sup>, но, как правило, наиболее технологичной и производительной является величина порядка 1–10 кВт/см<sup>2</sup>. Это позволяет довести до кипения любые известные на сегодняшний день вещества. Поэтому метод получения порошков оксидов путем их испарения из расплава с последующей конденсацией на воздухе перспективен и легко технически реализуем. Испарением из расплава можно получать ультрадисперсные порошки различных материалов, а также их оксиды, состоящие из частиц размером 30–100 нм и с удельной поверхностью более 100 м<sup>2</sup>/г. На рис. 7 показано распределение по размерам получаемых таким способом частиц оксида алюминия.

УД порошки, получаемые по электронно-лучевой технологии, проявляют более высокую активность при спекании, по сравнению с порошками, полученными другими способами, а температура начала их спекания на 150 °С ниже, чем у традиционных порошков. Размер зерна керамики, полученной из образующихся УДП, субмикронного уровня, что не имеет аналогов в мировой практике промышленного производства. Данный метод производства УД порошков более чист экологически и безопасен по сравнению с традиционными методами их получения.



## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

В.Л.АУСЛЕНДЕР, **А.П.ВОРОНИН**, А.И.КОРЧАГИН, И.Г.БОЧКАРЕВ,  
Р.А.САЛИМОВ, А.П.СУРЖИКОВ, А.М.ПРИТУЛОВ

*Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН*

*Институт горного дела СО РАН*

*Институт химии твердого тела и переработки минерального сырья СО РАН*

*Томский политехнический университет*

Возможно, наиболее впечатляющим и многообещающим может стать применение интенсивных пучков электронов вне вакуума в процессах твердофазного синтеза, спекания и легирования материалов. Эти процессы в совокупности называют радиационными термохимическими. Они проявляются с некоторой дозы поглощения излучения высокой энергии и сильно зависят от мощности дозы и температуры (при обычных температурах они не проявляются даже при очень больших поглощенных дозах излучения) и возникают с увеличением степени химических превращений по сравнению с чисто термическими условиями.

По ряду причин эти процессы стали изучать лишь относительно недавно. Во-первых, считалось, что излучение высокой энергии при повышенных температурах не должно оказывать существенного воздействия на твердофазные процессы ввиду того, что создаваемые в структуре дефекты должны при этих температурах быстро отжигаться и тем самым нейтрализовать действие излучения. Этот взгляд объяснялся отсутствием в теоретической литературе сведений о взаимодействии ионизирующего излучения с веществом при высоких температурах и методическими трудностями экспериментальных исследований. Во-вторых, интенсивные пучки электронов (особенно сфокусированные пучки) появились в распоряжении исследователей лишь в последние 20–25 лет.

В исследованиях со временем стало проявляться понимание процессов, происходящих в некоторых системах под действием интенсивного потока излучения высокой энергии, и вырабатываться теоретические

их концепции. По одной из них это понимание основывалось на тесной связи скорости диффузионно-контролируемых твердофазовых реакций с дефектностью кристаллической решетки, например, в важнейших для материаловедения процессах твердофазного синтеза, спекания и легирования материалов. Сформировалось утверждение, что именно в условиях высокоинтенсивного облучения можно ожидать ускорения этих реакций в результате увеличения дефектности решетки и динамического изменения ее потенциального рельефа.

Другая концепция исходит из того, что в объеме вещества при его интенсивном облучении генерируется большое число возбужденных электронных состояний, которое при достаточно большой мощности дозы излучения может достигать  $10^{18}$ – $10^{20}$  ед/см<sup>3</sup>. В отсутствие процессов автолокализации они могут мигрировать, а их термическая релаксация будет происходить на стоках, в качестве которых будут выступать поверхность раздела фаз, границы зерен, точечные и пространственные дефекты кристаллической структуры. Это может приводить к локальному перегреву, достигающему 200–500 К по сравнению со средней температурой образца. В результате должны резко активизироваться реакции синтеза и диффузионные процессы.

Появились и другие концепции, достаточно хорошо согласующиеся с рядом отдельных экспериментальных данных или, по крайней мере, объясняющие их. Они исходят из того, что, например, тормозящийся в веществе электрон сам создает локально перегретые области в поле своего трека. Размер такой об-

ласти может достигать  $10^4 \text{ \AA}$ , а перегрев – до 500 К, при этом высокая концентрация дефектов электронной подсистемы способна изменить механизм и активировать процессы взаимодействия с переносом заряда, которые широко распространены в химии твердого тела. Облучаемые диэлектрики способны накапливать большой объемный заряд, что приводит к пробое. Отсюда вытекает ряд явлений, свойственных веществу в сильных электрических полях, в том числе и активация некоторых высокотемпературных реакций. В ряде концепций не исключалась и генерация точечных дефектов за счет упругого взаимодействия ускоренных электронов с атомами вещества. Как правило, энергии релятивистских электронов достаточно для преодоления пороговой энергии образования точечных дефектов в металлах и полупроводниках.

Конечно, для каждой конкретной системы те или иные механизмы могут либо быть существенными, либо не играть роли. Возможно, что в ряде случаев влияние электронного пучка сводится к чисто термическому эффекту.

Влияние мощного электронного облучения ( $E = 1,5 \dots 2,5 \text{ МэВ}$ ,  $P = 1 \dots 3 \text{ Мрад/с}$ ,  $I = 2 \dots 100 \text{ мА}$ ) исследовалось с использованием ускорителей электронов, разработанных Институтом ядерной физики, типа ИЛУ-6, 8, и 10 с фольговым выпуском электронов в атмосферу и ускорителя типа ЭЛВ-6 с выпуском сфокусированного пучка. Эти исследования были осуществлены для широкого круга неорганических систем, высокотемпературные взаимодействия в которых (фазообразование, спекание) являются определяющими в технологических процессах неорганического синтеза. Так,  $\text{BaTiO}_3$  широко применяется для получения сегнетокерамики, ферриты Ba и Sr – исходный материал для ферромагнитных изделий, а молибдаты и вольфраматы стронция и свинца используются при изготовлении люминофоров и термоэммиттеров.

В табл. 1 представлен перечень химических систем, изученных группой институтов Сибирского отделения РАН и Томским политехническим институтом, в которых отмечен эффект радиационно-термической активации процессов взаимодействия. Величина эффекта и его зависимость от температуры различны в данных химических системах. Скорость синтеза под действием пучка ускоренных электронов увеличивается от 2–4 раз для систем  $\text{AO-B}_2\text{O}_3$  ( $A=\text{Pb, Sr}$ ;  $B=\text{Mo, W}$ ) до десятков раз в системе  $\text{CaO-SiO}_2$  (рис. 1).

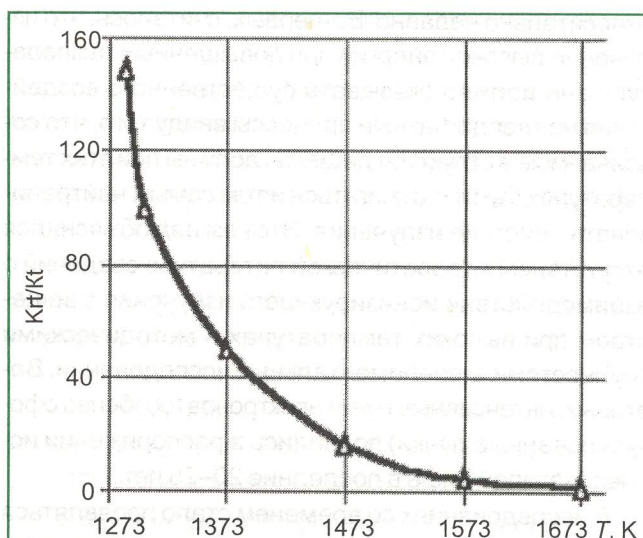
Выборочно останавливаясь на имеющихся экспериментальных результатах, можно отметить, что, на-

Таблица 1

**Реакции в твердотельном состоянии, ускоренные в радиационно-термическом процессе**

Системы	Продукты
$2\text{CaO}+\text{SiO}_2$	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$
$\text{Na}_2\text{CO}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$	$2\text{NaFeO}_2$
$\text{Na}_2\text{CO}_3+\text{Al}_2\text{O}_3$	$2\text{NaAlO}_2$
$\text{CaO}+\text{NaAlSiO}_4$	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4, \text{NaAlO}_2$
$\text{CaO}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2$	цемент
$\text{BaCO}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$
$\text{SrCO}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$
$2 \text{BaCO}_3+\text{SrCO}_3+\text{WO}_3$	$\text{Ba}_2\text{SrWO}_6$
$\text{SrMoO}_4+\text{SrWO}_4$	$\text{Sr}(\text{Mo, W})\text{O}_4$
$\text{PbO}+\text{MoO}_3$	$\text{PbMoO}_4$
$\text{PbO}+\text{WO}_3$	$\text{PbWO}_4$
$\text{Li}_2\text{CO}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{LiFeO}_2, \text{LiFe}_5\text{O}_8$
$\text{Li}_2\text{CO}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$	$\text{Li}(\text{Fe, Ti})_x\text{O}_y$
$\text{BaO}+\text{TiO}_2$	$\text{BaTiO}_3$
$\text{K}_2\text{CO}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$	$2\text{KFeO}_2$
$\text{K}_2\text{CO}_3+\text{Al}_2\text{O}_3$	$2\text{KAlO}_2$
$\text{ZnO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{ZnFe}_2\text{O}_4$
$\text{NiO}+\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{NiAl}_2\text{O}_4$
$\text{ZnO}+\text{Al}_2\text{O}_4$	$\text{ZnAl}_2\text{O}_4$
$\text{NiFe}_2\text{O}_4+\text{ZnFe}_2\text{O}_4$	$(\text{Zn, Ni})\text{Fe}_2\text{O}_4$

пример, температура синтеза  $\text{BaTiO}_3$  снижается при использовании мощного электронного облучения на  $350\text{--}400 \text{ }^\circ\text{C}$ . Кстати, заметим, что снижение температур в пределах  $100\text{--}200 \text{ }^\circ\text{C}$  имеет место при синтезе и всех других указанных в таблице систем. Синтез гексаферритов стронция и бария осуществляется за время в сотни раз меньшее по сравнению с существую-



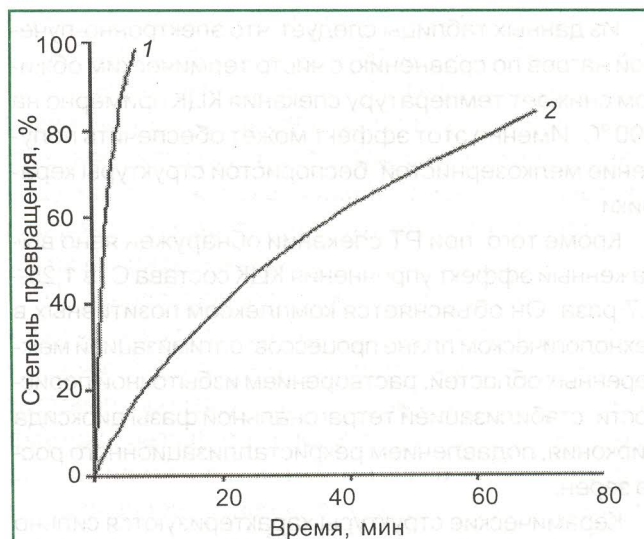
**Рис. 1. Температурная зависимость отношения констант образования дисилицида молибдена**

щей технологией (рис. 2). Причем последовательность и механизм фазовых превращений не изменяются. Интенсивность синтеза в этой системе связывается со снятием диффузионных сопротивлений и переводом процесса в кинетический режим. В радиационно-термическом процессе монофазный гексаферрит бария получается уже через 15 мин отжига реакционной смеси при температуре 1473 К. По существующей керамической технологии при той же температуре синтез длится 100–150 ч.

Известно, что при термических отжигах зачастую невозможно достичь полной глубины взаимодействия без ряда промежуточных помолов реагирующей смеси. При радиационном облучении возможно получать конечный продукт типа  $ABO_4$  ( $A=Pb$ ,  $B=Mo$ ,  $W$ ) в одну стадию. При обычном синтезе для этого необходимы три-четыре стадии термообработки, сопровождающиеся измельчением реакционной смеси.

Необходимо отметить, что высокая скорость взаимодействия и быстрый вывод на требуемый уровень температур при использовании для облучения интенсивного пучка могут значительно оптимизировать технологический процесс синтеза соединений, исходные компоненты которых имеют высокую летучесть. Принципиальная возможность этого была показана в экспериментах по синтезу соединений состава  $ABO_4$  ( $A=Pb$ ,  $Sr$ ;  $B=Mo$ ,  $W$ ) и твердых растворов на их основе. Процесс синтеза монофазного продукта при облучении ускоренными электронами завершается за 3–5 мин, включая время выхода на заданную температуру 1200–1400 К. В этих условиях практически не изменяется стехиометрия исходной смеси, что дает возможность получать продукт нужного состава.

Интересные результаты в ряде термохимических процессов с использованием сфокусированных пучков электронов получены совместными усилиями наших институтов при изучении воздействия пучка электронов на процессы синтеза различных керамик, сверхпроводящих и полупроводниковых материалов. Из большого числа процессов и материалов в этой области материаловедения, исследованных нами, отметим



**Рис. 2. Кинетика синтеза гексаферрита бария в радиационно-термических (1) и термических (2) условиях при температуре 1473 К**

лишь работы по изучению воздействия облучения на спекание инструментальной корундоциркониевой керамики (КЦК). Радиационное спекание КЦК осуществлялось на ускорителе ЭЛВ-6 (ИЯФ СО РАН) непрерывным пучком с энергией 1,4 МэВ. Средняя мощность поглощенной дозы составляла ( $10^4$ – $10^6$ ) кГр/с, что обеспечивало разогрев мишени до 2000 °С и выше. Образцы разогревались сфокусированным электронным пучком со скоростью (300–500) °С/мин.

Результаты сравнительного анализа процессов термического и радиационно-термического (РТ) спекания представлены в табл. 2. Здесь и далее сравнительный анализ представлен для систем следующих составов (содержание компонентов указывается в весовых процентах): состав  $C_1$  – 20,0%  $Al_2O_3$  – (76,0%  $ZrO_2$  – 4%  $Y_2O_3$ ), состав  $C_2$  – 80,0%  $Al_2O_3$  – (19,0%  $ZrO_2$  – 1%  $Y_2O_3$ ) и состав  $C_3$  – 20,4%  $Al_2O_3$  – (71,6%  $ZrO_2$  – 8%  $Y_2O_3$ ). В табл. 2, наряду с оптимальными температурами спекания, приведены также плотность спеченных образцов и прочность на изгиб ( $\sigma_{изг}$ ), микротвердость ( $H_v$ ) и трещиностойкость ( $K_{Ic}$ ).

Таблица 2

**Оптимальные режимы и физические свойства керамики, спеченной термически и с помощью электронного пучка**

Способ нагрева	Состав	$T_{отг}, ^\circ C$	$t, \text{ мин}$	$\rho, \text{ г/см}^3$	$\sigma_{изг}, \text{ МПа}$	$K_{Ic}, \text{ МПа} \cdot \text{ м}^{1/2}$	$H_v, \text{ ГПа}$
Термический	$C_1$	1800	60	5,5	570	9,2	12,8
Радиационно-термический	$C_1$	1600	60	5,4	713–973	13,6	–
Термический	$C_2$	1900	60	4,29	373	4,2	15,9
Радиационно-термический	$C_2$	1700	60	4,2	393	4,9	–

Из данных таблицы следует, что электронно-лучевой нагрев по сравнению с чисто термическим обжигом снижает температуру спекания КЦК примерно на 200 °С. Именно этот эффект может обеспечить получение мелкозернистой, беспористой структуры керамики.

Кроме того, при РТ спекании обнаружен явно выраженный эффект упрочнения КЦК состава С<sub>1</sub> в 1,25–1,7 раза. Он объясняется комплексом позитивных в технологическом плане процессов: оптимизацией межзеренных областей, растворением избыточной пористости, стабилизацией тетрагональной фазы диоксида циркония, подавлением рекристаллизационного роста зерен.

Керамические структуры характеризуются сильно развитой сетью межзеренных границ (МЗГ) и структурными несовершенствами на различных иерархических уровнях. В силу этого, как правило, керамика, полученная по традиционной технологии, представляет собой гетерогенную систему, весьма удаленную от состояния квазиравновесия, и имеет свойства, далекие от оптимальных. Проблема оптимизации дефектной структуры и свойств керамики может быть эффективно решена с помощью такого методического приема, как радиационно-термическое модифицирование (РТМ).

Процедура РТМ корундоциркониевой керамики технически осуществлялась путем облучения при высоких температурах образцов керамики, которые ранее уже были спечены в обычных термических условиях. Результаты экспериментов приведены в табл. 3.

Из данных таблицы видно, что радиационно-термическое модифицирование улучшает механические характеристики всех исследованных составов корундоциркониевой керамики. Для состава С<sub>2</sub> такое модифицирование дает приблизительно тот же эффект упрочнения структуры, как и радиационное спекание. Для состава С<sub>3</sub> прочность на изгиб может достигать 1100 МПа, а  $K_{1C} = 12,8 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ .

Изделия инструментального назначения испытывают при эксплуатации большие механические воздействия преимущественно в приповерхностных слоях размером от микрон до миллиметра. В связи с этим для крупногабаритных образцов достаточно упрочнить область, прилегающую к рабочей поверхности. Поэтому экономически выгодна комплексная технология, включающая термическое спекание и последующее лучевое упрочнение рабочей части.

Большой опыт накоплен в области синтезирования с использованием интенсивных пучков портландцементных клинкеров, представляющих собой сложные многофазные системы. Эти исследования были выполнены в основном силами сотрудников ГИПРОЦЕМЕНТА. Установлено, что в результате радиационно-термического синтеза и благодаря высокой температуре нагрева, превышающей 100 °С/с, возможно за время, в сотни раз меньшее, чем при обычных технологических условиях, получить конечные продукты, не только аналогичные традиционным, произведенным из того же сырья, но и превосходящие их по ряду физико-химических свойств (увеличение марочности цемента, его гидравлической активности, темпов набора прочности). Установлено также, что при радиационной технологии снижается на 150–250 °С температура клинкерообразования и на 10–15% удельный расход энергии. Это позволяет (наряду со значительным сокращением времени синтеза) резко интенсифицировать процесс получения портландцементного клинкера. Аналогичные результаты получены при синтезе белых и специальных цементов. Следует отметить, что при всех этих работах использовались ускорители ИЯФ типа ЭЛВ с устройствами выпуска в атмосферу сфокусированного пучка электронов.

Спекание и синтез при температуре до 1200 °С возможны также на ускорителях, оборудованных фольговой системой выпуска электронного пучка в атмосферу. Но радиационно-термические процессы, требу-

Таблица 3

### Свойства корундоциркониевой керамики, модифицированной электронным пучком

Технологический режим	Состав С <sub>3</sub>			Состав С <sub>2</sub>		
	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\sigma_{\text{изг}}$ , МПа	$K_{1C}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\sigma_{\text{изг}}$ , МПа	$K_{1C}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>
Термическое спекание при 1700 °С, 60 мин	5,63	406–659	7,9	3,71	317	3,9
Радиационное спекание при 1600 °С, 60 мин	5,75	713–980	12,7	3,95	393	4,5
Электронно-лучевое модифицирование при 1600 °С, 60 мин	5,79	865–1144	12,8	3,88	370	4,7

ющие более высоких температур, осуществимы только с использованием системы выпуска в атмосферу сфокусированного электронного пучка.

В связи с расширением применения различных видов конструкционных, электротехнических и других видов специальных керамик остро стоит вопрос получения исходных для такого производства материалов. Одним из методов является синтез в жидкой фазе оксидных и сложнооксидных соединений с помощью пучка ускоренных электронов. Принципиальным требованием, предъявляемым к указанным процессам, является высокая плотность мощности электронного пучка ( $\sim 10^3\text{--}10^4$  Вт/см<sup>2</sup>). Пучок электронов может быть использован при производстве таких материалов не только для их нагревания, но и для плавки и синтеза в жидком состоянии.

При получении плавящихся оксидных материалов могут быть применены такие способы промышленного производства, как плавка: в высокотемпературном тигле; конвейерного типа; со сливом расплавленной массы в приемник. Для каждого из этих способов производительность процесса плавки на установке, оборудованной ускорителем электронов ЭЛВ с системой выпуска в атмосферу сфокусированного пучка, составляет 40–100 кг/ч в зависимости от температуры плавления (1600–3000 °С) и свойств материалов при мощности пучка до 100 кВт.

При плавке электронным пучком со сливом расплавленной массы возможны следующие способы сбора конечного продукта: в монолитный блок; в воду (для получения гранулированного продукта); на вращающийся с высокой скоростью рифленый диск (для получения порошковых материалов). Полученные таким способом плавящиеся материалы являются высококачественным продуктом для изготовления конструкционных, диэлектрических, электропроводящих и теплоизоляционных керамик, абразивных материалов и спецстекло.

Жидкофазный синтез неорганических материалов электронным пучком является очень эффективным, поскольку за короткое время обеспечивает полное взаимодействие компонентов без нарушения стехиометрического состава. Керамические порошки, полученные из плавящихся таким способом материалов, при производстве керамики дают меньшую усадку на стадии спекания. Использование электронного пучка в качестве источника тепловой энергии обеспечивает чистоту синтеза, так как исключается загрязнение ис-

ходных материалов, а при использовании технического сырья одновременно происходит дополнительная очистка от низкотемпературных примесей. Применение различных методов охлаждения (медленное естественное охлаждение расплава, быстрое при сливе в воду или слив на вращающийся диск) позволяет регулировать микроструктуру материалов от поликристаллической до аморфной.

На основе переплавки мощным электронным пучком шихты из дешевого суперконцентрата природного магнетита, а также отходов традиционного катализаторного производства (в том числе и отсева мелкой фракции) разработан способ безотходного производства катализатора синтеза аммиака. Активность гранулированного конечного продукта, состоящего из фракции размером 1,5–4 мм, находится на уровне лучших мировых образцов. При этом его насыпной вес на 10% выше по сравнению со стандартным дробленым катализатором, а отходы переплава отсутствуют. Катализатор синтеза аммиака, полученный по радиационно-термической технологии, характеризуется стабильностью свойств и легкостью восстановления по сравнению с катализаторами, полученными традиционными способами. Производительность такого способа производства катализатора синтеза аммиака составляет 70–75 кг/ч при мощности пучка электронов 100 кВт.

Не менее интересно воздействие мощного электронного пучка на процессы вскрытия и обогащения минерального сырья. В результате радиационно-термической обработки увеличивается степень извлечения благородных металлов, удается значительно облегчить вскрытие различных ценных минералов, существенно снизить производственные затраты.

Генерация в руде сверхтермодинамической концентрации дефектов под действием электронного излучения приводит к изменению ее физико-механических свойств, выражающемся главным образом в снижении энергозатрат на измельчение руды. Так, продолжительность измельчения различных руд снижается в среднем на 35–40%, селективность извлечения в последующих процессах обогащения (флотации, магнитной сепарации и т.п.) повышается на 5–10%, как и селективность извлечения мономинеральных компонентов из полиметаллического сырья, процесс термического разложения сульфидов цинка, олова, дисульфидов молибдена и рения ускоряется в несколько раз.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.А.КОЛЕСНИКОВ, Е.Е.ПISКУНОВА,  
Р.А.САЛИМОВ, Г.А.СПИРИДОНОВ

*Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Ивановский научно-исследовательский институт пленочных материалов  
и искусственной кожи технического назначения» (ФГУП «ИвНИИПИК»)  
Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН*

Одной из важнейших задач в области разработки композиционных материалов является создание принципиально новых безотходных и энергосберегающих технологий, обеспечивающих производство материалов, обладающих комплексом заранее заданных свойств.

В основе всех современных технологий производства полимерных композитных материалов – один и тот же термохимический процесс полимеризации химических соединений. И хотя за многие годы промышленного развития этих технологий имело место их заметное совершенствование, тем не менее основные недостатки так и не были устранены и все больше стали подталкивать исследователей к изысканию способов коренного изменения технологии в соответствии с достижениями науки и техники. Эти недостатки были обусловлены прежде всего тем, что термохимический процесс полимеризации требует разогрева исходных материалов до 200–250 °С и заметной по длительности выдержки при этих температурах для завершения процесса полимеризации. Это в свою очередь требует затрат большого количества энергии и определяет медлительность производства, плохие условия труда для обслуживающего персонала (вследствие выделения в окружающую атмосферу вредных летучих компонентов при повышенных температурах), необходимость использования растворителей и др.

Предварительные исследования, выполненные в ИвНИИПИК, свидетельствовали о том, что перспективным путем решения данной проблемы может быть использование для полимеризации энергии ионизирующего излучения и создание на этой основе радиационно-химической технологии производства полимерных композиционных материалов. Относитель-

но малая толщина композитных материалов, высокие требования к скорости и производительности их выпуска практически сразу же определили, что в качестве источников ионизирующего излучения наиболее целесообразно использовать ускорители электронов, которые уже к началу разработки новой технологии имели мощные пучки электронов. Эти источники электронов позволяют обрабатывать от нескольких десятков до нескольких сот тысяч квадратных метров материала в год на одну установку. Конечно, определяющим фактором выбора источника излучения из их ограниченного состава (ядерные реакторы, отработанные ТВЭЛы и изотопные источники на основе радиоактивных кобальта и цезия) было то, что выключенные ускорители безопасны в радиационном отношении и могут в этом состоянии обслуживаться, как и любое другое электротехническое оборудование. Исходя из выбора источника излучения новую технологию (в отличие от прежней термохимической) стали называть электронно-химической технологией (ЭХТ), подчеркивая тем самым использование в процессе электронов высокой энергии, генерируемых ускорителями.

Предварительные исследования показали, что ЭХТ позволяет:

- ↘ осуществить более экономичный и совершенный (в частности, менее энергоемкий), чем любой из широко применяемых в настоящее время, способ изготовления композитных материалов и, что особенно важно, при непрерывном процессе производства;
- ↘ значительно ускорить существующие технологические процессы;
- ↘ изменять свойства композиций при использовании химически активных добавок и получать принци-

пально новые виды композиционных материалов на основе полимеров и их смесей, трудно сшиваемых обычными термохимическими методами, что способствует расширению ассортимента выпускаемой продукции и значительно улучшает ее потребительские качества;

- совершенствовать процессы отделки и придания выпускаемой продукции декоративно-защитных свойств;

- улучшить энергоэкологические характеристики технологического процесса и создать более благоприятные условия для работы персонала и др.

Исследования показали также, что эффективность применения ЭХТ в промышленности зависит главным образом от величины поглощенной дозы облучения при модифицировании полимеров и уровня физико-механических свойств получаемых материалов. В этой связи особо важное значение приобретает выбор высокоэффективных химических добавок – модификаторов полимерных композиций.

Проведенные в ИвНИИПИК исследования и опыт многолетнего использования показывают, что применение ЭХТ является особенно перспективным в процессах производства полимерных композиционных материалов для повышения:

- прочности и эластичности материалов при пониженных температурах;
- модуля упругости, устойчивости к растворителям, маслам и другим агрессивным средам;
- когезионной прочности полимерных композиций.

Эти показатели особенно важны в производстве материалов, используемых при низких температурах, а также при воздействии нефтепродуктов и агрессивных химических веществ, например, для средств индивидуальной защиты, кровельных, тентовых, обивочных и декоративно-отделочных, малоусадочных и пористых резин, самоклеящихся, кожеподобных и др.

Если не рассматривать детали многолетних исследований, выполненных в ИвНИИПИК по разработке технологии и в ИЯФ СО РАН по созданию ускорителей электронов для промышленного использования, а ограничиться их главными итогами, позволившими создать единственное в мировой практике промышленное производство рулонных композитных материалов с использованием ЭХТ, то основные результаты этой громадной работы могут быть сведены к следующим нескольким положениям:

- предложено решение проблемы ускорения реакций сшивания насыщенных и ненасыщенных полимеров и их смесей за счет образования химических

связей разной природы между макромолекулами при электронно-химическом модифицировании;

- найдены высокоэффективные модифицирующие системы, в 3–4 раза ускоряющие процессы радиационного сшивания полимера, позволяющие в несколько раз снизить требуемые дозы облучения и получить полимерные композиции с высокими физико-механическими свойствами;

- установлена взаимосвязь между структурой пространственной сетки полимеров, зависящей от природы и химического строения модификаторов, и физико-механическими свойствами вулканизатов;

- показана возможность направленного регулирования технологических, эксплуатационных и специальных свойств композиций на основе резко выраженных синергических эффектов при введении моно- и полифункциональных соединений акрилового ряда в полимеры и их смеси;

- изучено влияние целевых ингредиентов на электронно-химические процессы, протекающие в полимерных композициях в целях формирования оптимальных рецептур полимерных композиционных материалов с требуемым комплексом свойств;

- показаны пути электронно-химической совулканизации смесей полимеров, резко отличающихся по химической природе, но обладающих ценным комплексом свойств, совулканизация которых не может быть обеспечена обычным термохимическим или радиационным воздействием;

- изучены особенности формирования отделочных покрытий из жидких композиционных материалов и разработана ЭХТ декоративно-отделочных покрытий широкого ассортимента без применения органических растворителей;

- выполнен расчет и обоснован выбор ускорителей электронов, показано, что оптимально использовать в производстве полимерных композиционных материалов электронно-химические установки с ускорителями электронов (энергия 0,8–1,5 МэВ, мощность 50–100 кВт);

- разработаны и созданы ускорители электронов с необходимой для производственных процессов мощностью, энергией и работоспособностью;

- созданы четыре технологические линии по промышленному производству широкой гаммы композитных материалов на базе разработанных ЭХТ.

Рассмотрим в некоторых деталях лишь вопросы о модифицирующих добавках, создании материалов на основе смеси полимеров, а также создании опытно-промышленной и промышленных установок на основе ЭХТ.

### ВЛИЯНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ ДОБАВОК НА СНИЖЕНИЕ ТРЕБУЕМЫХ ДЛЯ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ

Максимальная производительность процесса радиационного модифицирования полимеров достигается главным образом путем снижения оптимальной (с точки зрения достижения необходимых свойств материала) поглощенной дозы облучения до минимально возможной. Это обеспечивается введением в полимерные композиции специальных добавок, сенсibiliзирующих реакции и приводящих к образованию пространственно-сшитых полимеров. В результате интенсивной прививочной полимеризации, протекающей при дозах, которые значительно меньше оптимальных доз для сшивания, в матрице полимера образуются узлы трехмерной сетки, содержащие отдельные молекулы или блоки ненасыщенных соединений. Особенно активно участвуют в реакции трехмерной прививочной полимеризации полифункциональные ненасыщенные соединения (ПФНС) (мет)акрилового и аллилового ряда, а также малеимиды и др. Особое место среди активаторов радиационного сшивания полимеров занимают так называемые олигоэфиракрилаты – сложные эфирные системы на основе дикарбоновых кислот, полиспиртов и (мет)акриловой кислоты при радиационном сшивании эластомеров, предложен новый класс эффективных модификаторов – кристаллогидратов солей поливалентных металлов солей (мет)акриловой кислоты.

Для установления общей закономерности влияния активаторов радиационного сшивания на свойства вулканизатов изучена структура пространственных сеток в насыщенных и ненасыщенных полимерах при радиационном облучении в присутствии моно- и полифункциональных акриловых соединений. При этом показано, что широко используемые активаторы радиационного сшивания полимеров – олигоэфиракрилаты – снижают оптимальные поглощенные дозы облучения, но существенно ухудшают физико-механические и особенно эластические свойства вулканизатов, что затрудняет их использование для модифицирования полимерных композиционных материалов. Причины этого состоят в том, что увеличение числа двойных связей в молекуле приводит к избыточному росту концентрации поперечных связей и функциональности узлов пространственной сетки.

Изучен механизм радиационной полимеризации (мет)акриловых ПФНС в вязких средах эластомерных матриц. Установлена природа активных центров, иницирующих полимерные цепи в реакциях прививоч-

ной полимеризации этих модификаторов эластомеров. Показано, что образующиеся при облучении макро-радикалы иницируют реакции прививочной полимеризации акриловых мономеров с каучуками, а образование сшивок осуществляется через привитые (мет)акриловые цепи, что и обуславливает зависимость физико-механических свойств радиационно-химических вулканизатов от природы и химического строения модифицирующих добавок.

На основе развитых представлений о взаимосвязи между химическим строением модификаторов и свойствами вулканизатов предложен и обоснован механизм реакций сшивания ненасыщенных и насыщенных полимеров в присутствии моно- и полифункциональных производных (мет)акриловой кислоты благодаря образованию химических поперечных связей разной природы между макромолекулами при электронном модифицировании. Такие сетчатые структуры формируются в результате одновременного протекания реакций сшивания и прививочной полимеризации модификаторов в полимерной матрице. В качестве ПФНС, позволяющих формировать связи различной химической природы при радиационном сшивании эластомеров, предложен новый класс эффективных модификаторов – кристаллогидратов солей поливалентных металлов солей (мет)акриловой кислоты. Показано, что прививочная полимеризация солей в полимерной матрице происходит на границе раздела фаз макромолекула–вода–кристалл соли, а процесс образования сшитых структур осуществляется через частицы привитой полимерной соли.

Для уменьшения концентрации поперечных связей и функциональности узлов пространственной сетки, образующейся при полимеризации добавок в насыщенных и ненасыщенных полимерах, предложено использовать в качестве модификаторов смеси моно- и полифункциональных (мет)акриловых соединений. Для получения вулканизатов с наилучшими характеристиками полифункциональные узлы их пространственной сетки, образованные ПФНС, должны быть разделены привитыми цепями монофункциональных ненасыщенных соединений (МФНС) в 10–12 звеньев, т.е. на каждую двойную связь ПФНС должно приходиться 5–6 звеньев МФНС.

Установлено, что смеси МФНС и ПФНС (мет)акриловых соединений в 3–4 раза снижают оптимальные поглощенные дозы облучения и обеспечивают значительное повышение экономической эффективности ЭХТ производства полимерных композиционных материалов.

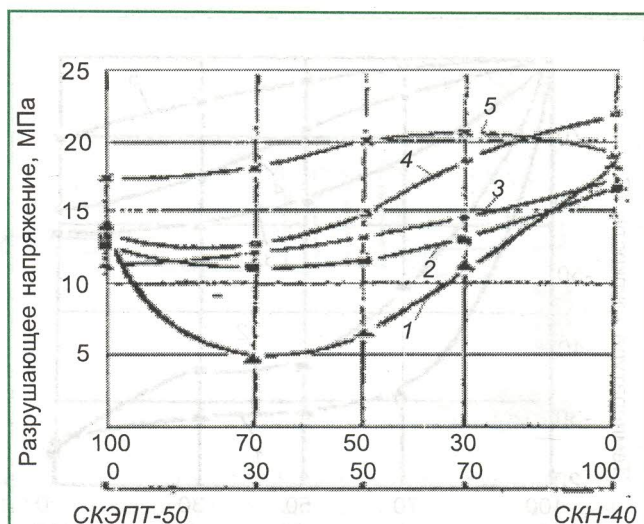


**РОЛЬ СПЕЦИАЛЬНЫХ ДОБАВОК  
В СОВУЛКАНИЗАЦИИ СМЕСЕЙ ПОЛИМЕРОВ**

Расширяющиеся области использования полимерных материалов требуют сочетания взаимоисключающих свойств, которые невозможно получить в одном полимере. Создание таких материалов возможно лишь на основе смесей полимеров, т.е. за счет смешения полимеров, заметно отличающихся по свойствам. Однако практическое использование смесей полимеров встречает большие трудности, поскольку, как правило, такие полимеры при термохимическом процессе не совулканизируются, а без этого свойства смесей неудовлетворительные. Основными причинами низких свойств материалов из смесей полимеров являются: различные скорости вулканизации полимеров разной химической природы; различная растворимость вулканизирующих агентов в полимерах; диффузия вулканизирующих агентов в процессе вулканизации в фазу полимера с большей ненасыщенностью. Решение такой задачи возможно при использовании излучения высокой энергии при одновременном модифицировании композиций эффективными химическими добавками.

В целях выявления роли модификаторов и состава полимеров в формировании свойств радиационных вулканизатов изучена совулканизация смесей СКЭПТ-СКН, СКД-СКН, СКЭПТ-наирит, СКЭПТ-ХСПЭ при разном соотношении эластомеров и смесей МФНС и ПФНС. Для всех исследуемых смесей зависимость разрушающего напряжения от состава в присутствии смесей модификаторов значительно выше аддитивной. Некоторые сравнительные данные представлены на рис. 1, на котором видна значительная роль модификаторов в процессах радиационно-химической совулканизации полимеров. Наряду с прочностными показателями, соотношение модификаторов очень сильно влияет на морозостойкость (рис. 2) и динамические характеристики резин при пониженных температурах (табл. 1).

Существенное отличие радиационного сшивания полимеров и их смесей в присутствии ненасыщенных соединений разной функциональности (в том числе и солей) от термохимической вулкани-



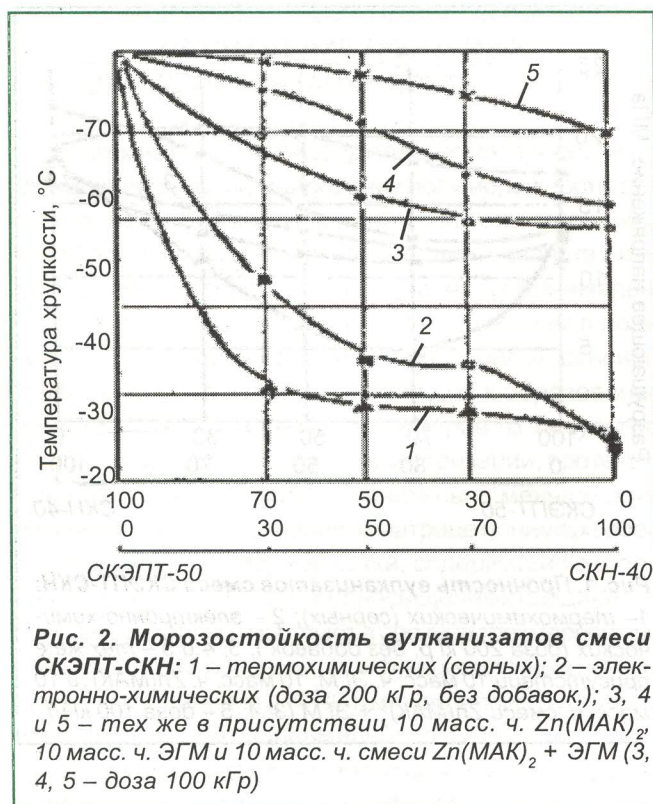
**Рис. 1. Прочность вулканизатов смеси СКЭПТ-СКН:**  
1 – термохимических (серных); 2 – электронно-химических (доза 200 кГр, без добавок); 3, 4 и 5 – тех же в присутствии 10 масс. ч. ЭГМ, 10 масс. ч. Zn(MAK)<sub>2</sub> и 10 масс. ч. смеси Zn(MAK)<sub>2</sub> + ЭГМ (3, 4, 5 – доза 100 кГр)

зации заключается в том, что после смешения композиции в процессе переработки сшитые структуры образуются в течение 2–10 с при температуре 40–60 °С (по сравнению с десятками минут и температурой 160–200 °С при обычном способе вулканизации). В этих условиях диффузионные процессы не играют определяющей роли. Сформированная в процессе смешения в присутствии модификаторов структура смеси полимеров фиксируется образующейся при облучении пространственной сеткой с заданным оптимальным соотношением связей разной химической приро-

Таблица 1

**Устойчивость к многократному изгибу  
наполненных радиационных и радиационно-химических  
вулканизатов смесей эластомеров (тыс. циклов)**

Состав вулканизата	Без модификаторов при температуре		10 масс. ч. ПФНС:МФНС = 3:7 при температуре	
	20 °С	-40 °С	20 °С	-40 °С
СКЭПТ:СКН-18 = 30:70	500	6	500	15
СКЭПТ:СКН-26 = 30:70	300	4	500	12
СКЭПТ:СКН-40 = 30:70	200	3	500	10
СКЭПТ:СКД = 30:70	500	3	500	20
СКД:СКН-40 = 30:70	500	4	500	10



ды, как и в случае индивидуальных полимеров, что обеспечивает высокие физико-механические свойства вулканизатов.

**Сравнительные технико-экономические показатели электронно-химической и термохимической технологий производства эластомерного рулонного кровельного материала (объем выпуска 2 млн м<sup>2</sup> в год)**

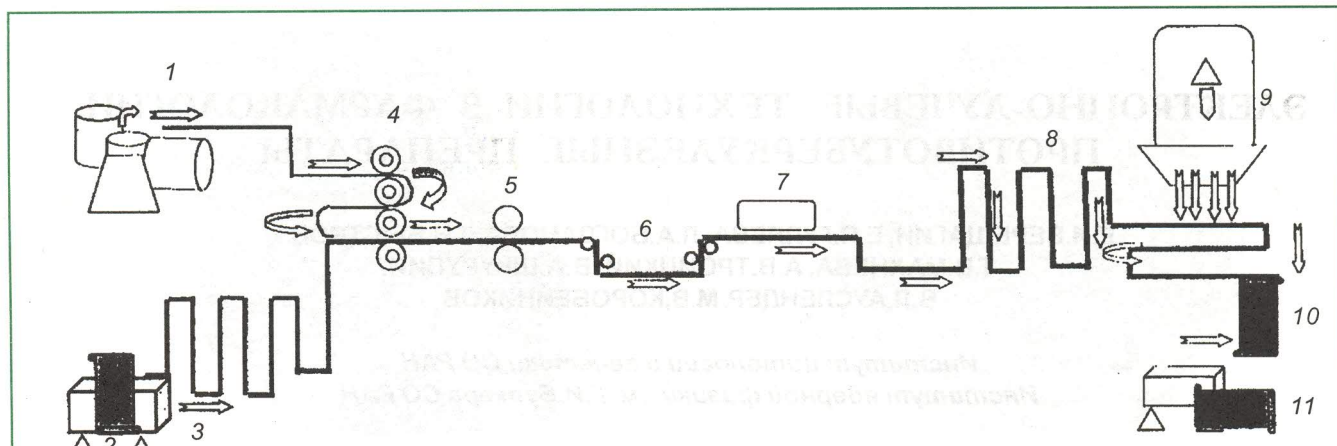
Показатели	Электронно-химическая технология	Термохимическая технология
Характеристика процесса	Непрерывный; поточная линия	Периодический
Скорость процесса, м/мин	1,5–8	1–2
Капитальные затраты на оборудование, млн руб. (в ценах 1991 г.)	0,773	2,07
Снижение энергозатрат, кВт·ч/1000 м <sup>2</sup>	170	–
Снижение теплотрат, Гкал/1000 м <sup>2</sup>	5,5	–
Снижение численности основных рабочих, раз	1,5–2	–
Уменьшение производственных площадей, раз	4	–
Срок окупаемости технологической линии, год	1,5–2	–

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПОЛИМЕРНЫХ РУЛОННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Для создания ЭХТ производства полимерных композиционных материалов наиболее перспективно использование радиационно-химических установок (РХУ) с ускорителями электронов. Ввиду малой толщины обрабатываемых материалов (0,1–2,0 мм) достаточными и оптимальными являются ускорители электронов с энергией 0,3–1,5 МэВ, обеспечивающие проведение технологического процесса со скоростью 15–30 м/мин (по сравнению с 2–8 м/мин на существующем вулканизационном оборудовании).

Вид и условия облучения существенным образом влияют на кинетику электронно-химических процессов, протекающих в полимерных композициях, и на свойства вулканизатов. Так, при  $\gamma$ -облучении системы дозами 200–400 кГр требуется 10–30 ч, что объясняется сравнительно низкими мощностями доз  $\gamma$ -установок. При облучении ускорителями электронов достаточно 10–20 с, процесс сшивания проходит в атмосфере воздуха и не требует инертной среды. При использовании эффективных модификаторов и при мощностях доз 30 кГр/с время облучения полимерной композиции составляет 2–5 с.

Выявление оптимальных параметров радиационного процесса при использовании РХУ с ускорителями электронов является важной задачей и определяет его эффективность. При этом особое значение имеют определение поглощенной дозы и ее распределение в объеме облучаемого объекта. Зная распределение поглощенной дозы в материале и его параметры, можно выбрать оптимальные режимы работы ускорителя, технологические условия. При оптимизации распределения доз в облучаемом материале задача сводится к правильному выбору способа облучения, нахождению оптимальной толщины облучаемого материала, определению оптимальной энергии электронного пучка и вычислению потерь его энергии в фольге, воздухе и материале.



**Рис. 3.** Схема опытно-промышленной технологической линии по производству рулонных полимерных композиционных материалов на базе ускорителя ЭЛВ-2: 1 – участок приготовления смеси; 2 – размоточное устройство; 3 – компенсаторы; 4 – каландр; 5 – уплотнительно-тисильная пара; 6 – охлаждающие барабаны; 7 – отделочное устройство; 8 – компенсаторы; 9 – ускоритель электронов; 10 – намотка готовой продукции; 11 – участок разбраковки и упаковки готовой продукции

На базе выполненных исследований совместно с ИЯФ СО РАН была создана и введена в эксплуатацию в ИвНИИПИК опытно-промышленная линия по производству композиционных материалов с ускорителем электронов ЭЛВ-2, схема которой представлена на рис. 3.

Показанная на рисунке схема предусматривает осуществление процесса производства электронно-модифицированных полимерных композиционных материалов по каландровой технологии. Анализ данной схемы показывает, что ускорители электронов хорошо вписываются в непрерывный каландровый поток производства полимерных композиционных материалов, не требуют дополнительного технологического оборудования.

Аналогичные линии эксплуатируются на АО «Кировский комбинат искусственных кож» (с ускорителем электронов ЭЛВ-6 ИЯФ), Уфимском заводе РТИ (с ускорителем электронов ЭЛВ-8 ИЯФ), АО «Ивановский КИП» (с ускорителем электронов «Электрон-10М» НИИЭФА).

В табл. 2 в качестве примера приведены сравнительные технико-экономические показатели электронно- и термохимической технологий производства эластомерного рулонного кровельного материала.

В результате многолетней эксплуатации указанных технологических линий установлено, что электронно-химическая технология производства позволяет:

- интенсифицировать в 2–3 раза существующие технологические процессы производства искусственных кож в результате высоких скоростей структуриро-

вания полимерного покрытия под действием ионизирующего излучения (время облучения 1–3 с вместо 10–20 мин при термической вулканизации);

- уменьшить в 10–15 раз теплоэнергетические затраты путем замены существующего энергоемкого вулканизационного оборудования высокопроизводительными установками с ускорителями электронов;

- снизить в 5–7 раз энергетические затраты за счет исключения наиболее энергоемких операций из производственного цикла, в том числе полного исключения необходимости рекуперации растворителей;

- снизить на 20–50% материалоемкость продукции благодаря формированию тонких полимерных слоев непосредственно на подложке;

- сократить в среднем на 50% занимаемые производственные площади;

- сократить отходы и потери сырья в процессе производства, уменьшить количество вспомогательных материалов;

- улучшить экологические показатели производства и условия труда работающих за счет снижения температуры на всех производственных операциях до комнатной, а также исключения растворителей и других токсичных и взрывоопасных ингредиентов.

Разработанная электронно-химическая технология искусственных кож защищена 40 авторскими свидетельствами СССР и патентами РФ.

Ежегодно по ЭХТ на существующих линиях промышленностью выпускается порядка 110 тыс. м<sup>2</sup> рулонных полимерных композиционных материалов различного назначения.

## ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ФАРМАКОЛОГИИ. ПРОТИВОТУБЕРКУЛЕЗНЫЕ ПРЕПАРАТЫ

Е.И.ВЕРЕЩАГИН, Е.П.ГУЛЯЕВА, Л.А.БОГДАНОВА, Т.Н.БЫСТРОВА,  
Т.В.МАХНЕВА, А.В.ТРОИЦКИЙ, В.А.ШКУРУПИЙ,  
В.Л.АУСЛЕНДЕР, М.В.КОРОБЕЙНИКОВ

*Институт цитологии и генетики СО РАН  
Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН*

Развитие фармакологии на рубеже столетий – это поиск принципиально новых форм получения лекарственных препаратов. Эпоха химического синтеза простых лекарственных средств уже прошла, и сейчас фармацевтический рынок полностью насыщен синтетическими препаратами. Одним из популярных направлений развития фармакологии является получение сложных лекарственных композиций, содержащих биологически активные вещества (белки, ферменты, фрагменты генома и т.д.), в том числе полученных на основе технологии иммобилизации. При иммобилизации биологически активное вещество химически связывается с каким-либо полимерным носителем, что позволяет целенаправленно изменять биологические и фармакологические свойства препарата. Альтернативой химическим процессам иммобилизации в фармакологии могут служить электронно-лучевые технологии. Использование ионизирующего излучения позволяет активировать различные полимерные носители и иммобилизовать на них биологически активные вещества, целенаправленно изменяя их свойства.

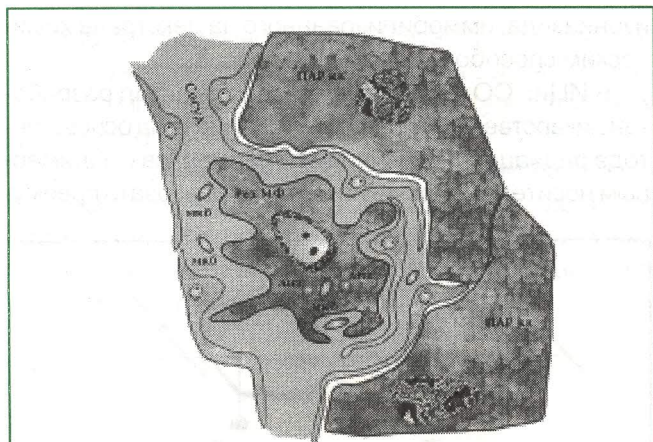
Одним из примеров практической реализации электронно-лучевой технологии является противотуберкулезный препарат «Изодекс», который разработан ИЦиГ СО РАН совместно с ИЯФ СО РАН.

Выбор проблемы создания нового противотуберкулезного препарата не случаен. Во всем мире интерес к разработке таких препаратов, особенно со стороны крупных фармацевтических фирм, постоянно растет. Это обусловлено эпидемиологическими аспектами заболеваемости туберкулезом. За последние 10 лет заболеваемость туберкулезом легких увеличилась в несколько раз и приняла характер эпидемии, а в развивающихся и экономически отсталых странах приобрела черты пандемии.

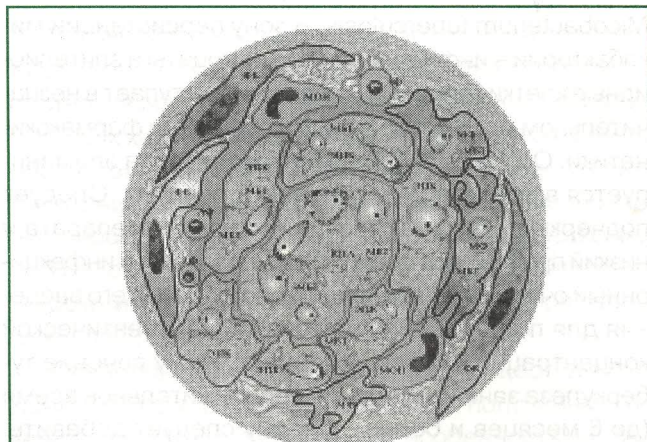
Современная биологическая и медицинская наука позволяет вычлнить две основные причины развития такого драматического сценария: высокая толерантность возбудителя туберкулеза к химиотерапии и отсутствие высокоэффективных противотуберкулезных препаратов.

Возбудитель туберкулеза – палочка Коха (латинское название *Micobacterium tuberculosis*) – относится к древнейшим микроорганизмам, эволюция которых насчитывает миллионы лет. В ходе эволюции эта бактерия приспособилась к внутриклеточному развитию и является внутриклеточной инфекцией. К таким же инфекциям относятся заболевания: малярия, токсо-, мико- и уроплазмоз, хламидиоз. Все эти заболевания крайне сложны в лечении, несмотря на достаточно обширный арсенал противопаразитарных препаратов, с помощью которых иногда удается стабилизировать процесс распространения заболевания. Возбудитель может иметь сниженный уровень обмена веществ и развиваться крайне медленно, что делает его устойчивым к химиопрепаратам. Микобактерии обладают прочной полисахаридной клеточной стенкой, которая при неблагоприятных внешних условиях может трансформироваться в многослойную, при этом бактерии становятся практически недоступными для действия антибиотиков (так называемые L-формы *Micobacterium tuberculosis*).

Попавшие в организм человека микобактерии подвергаются фагоцитозу – атаке фагоцитами, клетками иммунной системы, которые поглощают их. Однако микобактерии, попадаящие внутрь фагоцитов, сохраняют свою жизнедеятельность и не подвергаются лизису (разложению) под воздействием внутриклеточных ферментов фагоцитов. В результате сами фагоциты (стражи молекулярного эпидемиологического порядка в организме человека) становятся местом раз-



**Рис. 1. Начальный этап развития гранулемы:**  
ПАР кл – паренхиматозная клетка; Рез МФ – резидентный макрофаг; мкб – микобактерия; лиз – лизосома



**Рис. 2. Зрелая туберкулезная гранулема:** КПЛ – клетка Пирогова–Лангханса; мкб – микобактерия туберкулеза; ЭПК – эпителиоидная клетка; ЛФ – лимфоцит; МОН – моноцит; МФ – макрофаг; ФБ – фибробласт

вития и размножения возбудителей туберкулеза *Micobacterium tuberculosis*.

На рис. 1 изображен начальный этап поглощения микобактерии фагоцитом и ее внутриклеточного развития. Резидентный фагоцит – основной элемент иммунологической обороны нашего организма – захватывает микобактерии туберкулеза, однако при этом не происходит их «утилизация» ферментами, находящимися в лизосомах фагоцитов. Эта способность микобактерий выживать внутри фагоцитов дает им возможность использовать макрофаги как временное «жилище» для своего развития и размножения.

Особенно опасны специфические образования – гранулемы, представляющие собой гигантские скопления трансформированных в эпителиоидные клетки фагоцитов, которые «нафаршированы» живыми *Micobacterium tuberculosis*. На рис. 2 показана зрелая туберкулезная гранулема. Это специфическое образование представлено многоядерными клетками иммунной системы, которые поглотили микобактерии туберкулеза, но не смогли их обезвредить. Организм человека пытается оградить очаг опасной инфекции путем развития фиброза, т.е. формирования прочной соединительно-тканной капсулы из коллагеновых волокон, производимых фибробластами.

Туберкулезная гранулема – это классический биологический дремлющий вулкан. При определенных условиях ослабления иммунобиологической резистентности организма человека происходит спонтанная гибель эпителиоидных клеток туберкулезной гранулемы, их гидролитический «взрыв» за счет выхода протеолитических ферментов из лизосом и «расплавление»

гранулемы с выходом большого количества микобактерий в кровотоки. Часть циркулирующих в кровотоке *Micobacterium tuberculosis* вновь захватывается фагоцитами, и жизненный цикл развития возбудителя туберкулеза повторяется (происходит повторный виток инфицирования с захватом новых «территорий»). Несомненно, имеются и другие особенности *Micobacterium tuberculosis*, однако они играют второстепенную роль в развитии туберкулеза.

Следующей составляющей эпидемиологического неблагополучия является достаточно узкий спектр высокоэффективных противотуберкулезных препаратов, выпускаемых предприятиями фарминдустрии. Не вдаваясь в детали описания существующих противотуберкулезных препаратов (к ним относятся рифампицин, стрептомицин, пиперазид, ПАСК и т.д.), хотелось бы остановиться на гидразиде изоникотиновой кислоты (изониазиде) и его многочисленных производных (фтивазиде, салюзиде, метазида). Изониазид является базовым антимикобактериальным препаратом 1-й группы и входит во все базовые терапевтические схемы лечения туберкулеза. Этот препарат был создан в конце 1950-х годов, и до настоящего времени не существует более эффективного аналога, превосходящего его по спектру терапевтической активности. *In vitro* (в клеточных культурах) изониазид обладает высокой антимикобактериальной активностью, в том числе и в отношении L-формы *Micobacterium tuberculosis*. Однако *in vivo* (в живом организме) изониазид значительно менее эффективен вследствие внутриклеточной локализации возбудителя. При поступлении изониазида в кровотоки гибнут свободноциркулирующие

*Micobacterium tuberculosis*. В зону персистенции микобактерий – инфицированные фагоциты и эпителиоидные клетки гранулем – препарат поступает в незначительном количестве ввиду особенности фармакокинетики. Около 90% вводимого изониазида элиминируется в течение 24 ч печенью и почками. Следует подчеркнуть, что быстрая элиминация препарата и низкий процент доставки туберкулостатика в инфекционный очаг обуславливают периодичность его введения для поддержания постоянной терапевтической концентрации в крови. Именно поэтому лечение туберкулеза занимает весьма продолжительное время (до 6 месяцев и более). К этому следует добавить, что изониазид, как и другие противотуберкулезные препараты, относится к высокотоксичным соединениям и лечение туберкулеза сопровождается токсическими осложнениями со стороны печени, почек и ЦНС. Очевидно, что терапия туберкулеза изониазидом была бы более эффективной и сопровождалась бы значительно меньшим процентом осложнений, если бы удалось придать этому препарату свойство селективно доставляться в инфицированные макрофаги.

В г. Новосибирске под руководством чл.-корр. РАНН, профессора Вячеслава Алексеевича Шкурупия в конце 1980-х годов был развернут цикл научно-исследовательских работ по созданию нового противотуберкулезного препарата, обладающего способностью селективно доставляться в инфицированные *Micobacterium tuberculosis* фагоциты для проведения так называемой «адресной» терапии туберкулеза. В этой работе активное участие приняли коллектив исследователей из Новосибирской медицинской академии и Новосибирского НИИ туберкулеза Минздрава РФ. В качестве действующей основы разрабатываемого препарата был использован широко известный туберкулостатик – изониазид. Для придания изониазиду селективной фаготропности он был химическим способом связан с полисахаридной матрицей – декстраном. Исследования *in vitro* и *in vivo* показали, что препарат обладает не только высокой антимикобактериальной активностью, но и значительно менее токсичен, чем исходно взятый, свободный изониазид. Основными препятствиями на пути внедрения нового препарата в фармацевтическое промышленное производство были высокая стоимость и сложность химического синтеза, который включал более 10 стадий, в том числе таких низкотехнологичных с точки зрения фармацевтического промышленного производства, как многократное спиртовое осаждение и диализ.

Последовательность химических реакций при получении гидразида изоникотиновой кислоты (ИИА) –

изониазида, иммобилизованного на декстране химическим способом, показана на рис. 3.

В ИЦиГ СО РАН в 1990-х годах уже был разработан лекарственный препарат имозимаза на основе метода радиационной «сшивки» ферментов с полимерным носителем. Возникла идея использовать преиму-

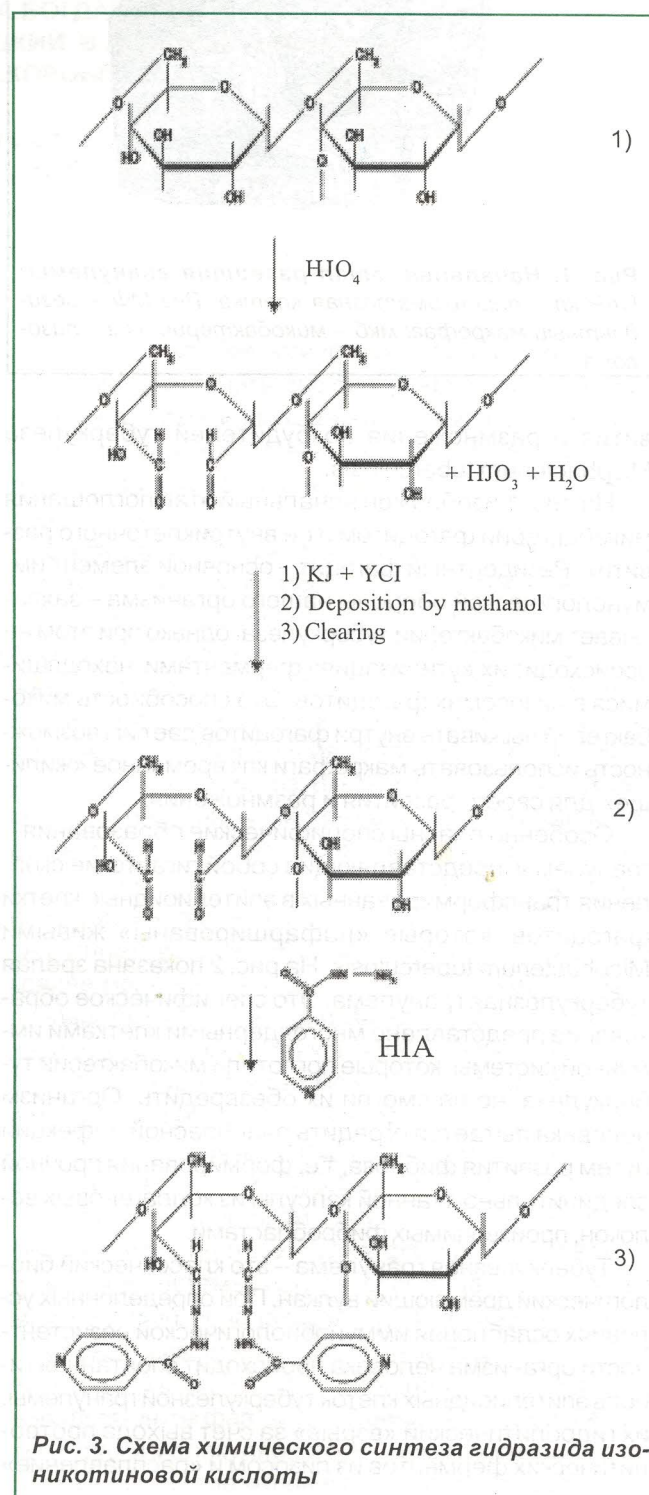
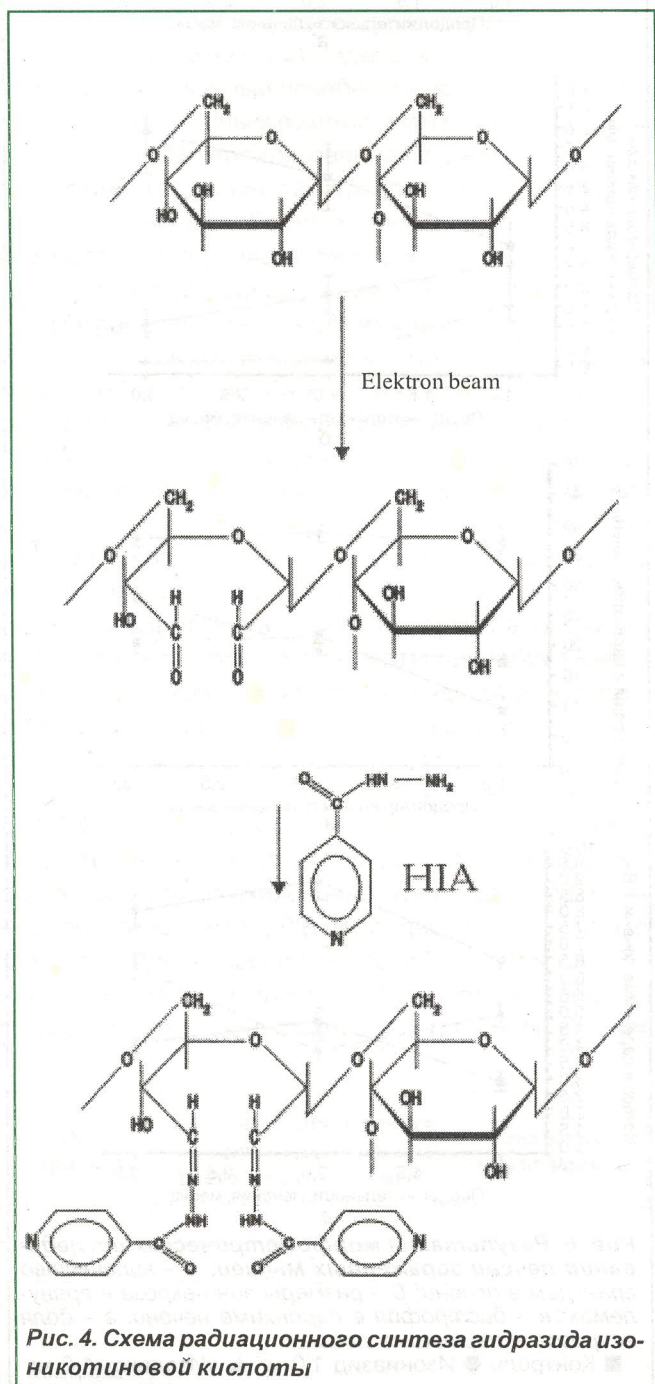


Рис. 3. Схема химического синтеза гидразида изоникотиновой кислоты

щества радиационной иммобилизации для создания перспективного комплекса декстрана с изониазидом, который мог бы стать новым противотуберкулезным препаратом.

Схема технологии радиационного синтеза гидразида изоникотиновой кислоты показана на рис. 4. Для радиационной активации декстрана (РАД) используется пучок электронов, генерируемый мощным ускорителем электронов ИЛУ-6.



**Рис. 4. Схема радиационного синтеза гидразида изоникотиновой кислоты**

В результате исследований был создан препарат «Изодекс» – усовершенствованный аналог комплекса изониазида с декстраном, получавшегося ранее методом химического синтеза. Препарат «Изодекс» представляет собой гизразид изоникотиновой кислоты (изониазид), иммобилизованный на радиационно-активированном декстране. Источником полисахаридной матрицы является декстран, входящий в состав широко известного плазмозамещающего раствора «Реополиглюкин».

Очевидны технологические преимущества «Изодекса» перед его предшественником, полученным химическим путем, связанные с особенностями РАД (рис. 3, 4):

– РАД проходит в одну стадию. В реакционную смесь не вводятся токсичные, агрессивные химические реагенты, и поэтому активированный декстран не нуждается в сложных и дорогостоящих методах очистки;

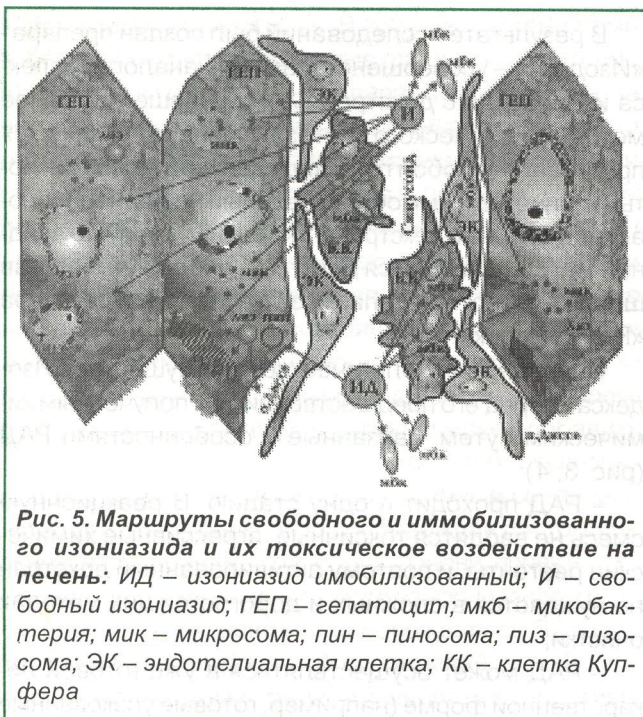
– РАД может осуществляться в уже готовой лекарственной форме (например, готовые упакованные флаконы «Реополиглюкина»), при этом сохраняется стерильность готового продукта;

– РАД легко управляется энергией источника ионизирующего излучения и может быть легко адаптирована к существующим промышленным фармацевтическим линиям, использующим метод радиационной стерилизации;

– иммобилизация изониазида на радиационно-активированном декстране осуществляется также в одну стадию, при этом совмещаются процессы иммобилизации и стерилизации препарата (условия стандартного промышленного автоклавирования).

В связи с тем, что разработанная технология весьма пластична и позволяет регулировать степень иммобилизации изониазида на декстране, было концептуально определено, что готовая лекарственная форма должна содержать как иммобилизованный изониазид, так и свободный (примерно эквивалентное соотношение). Иммобилизованный на декстране изониазид обеспечивает «адресную» терапию туберкулеза внутри фагоцитов, поскольку декстран легко проникает внутрь их (он участвует в обмене веществ фагоцитов), а свободный изониазид обеспечивает воздействие на циркулирующую в крови популяцию *Micobacterium tuberculosis*. Этим достигается комплексность терапевтического эффекта «Изодекса» и низкое повреждающее действие препарата на печень.

Биологические маршруты свободного изониазида и изониазида, иммобилизованного на декстране, показаны на рис. 5. Обе формы изониазида, входящие



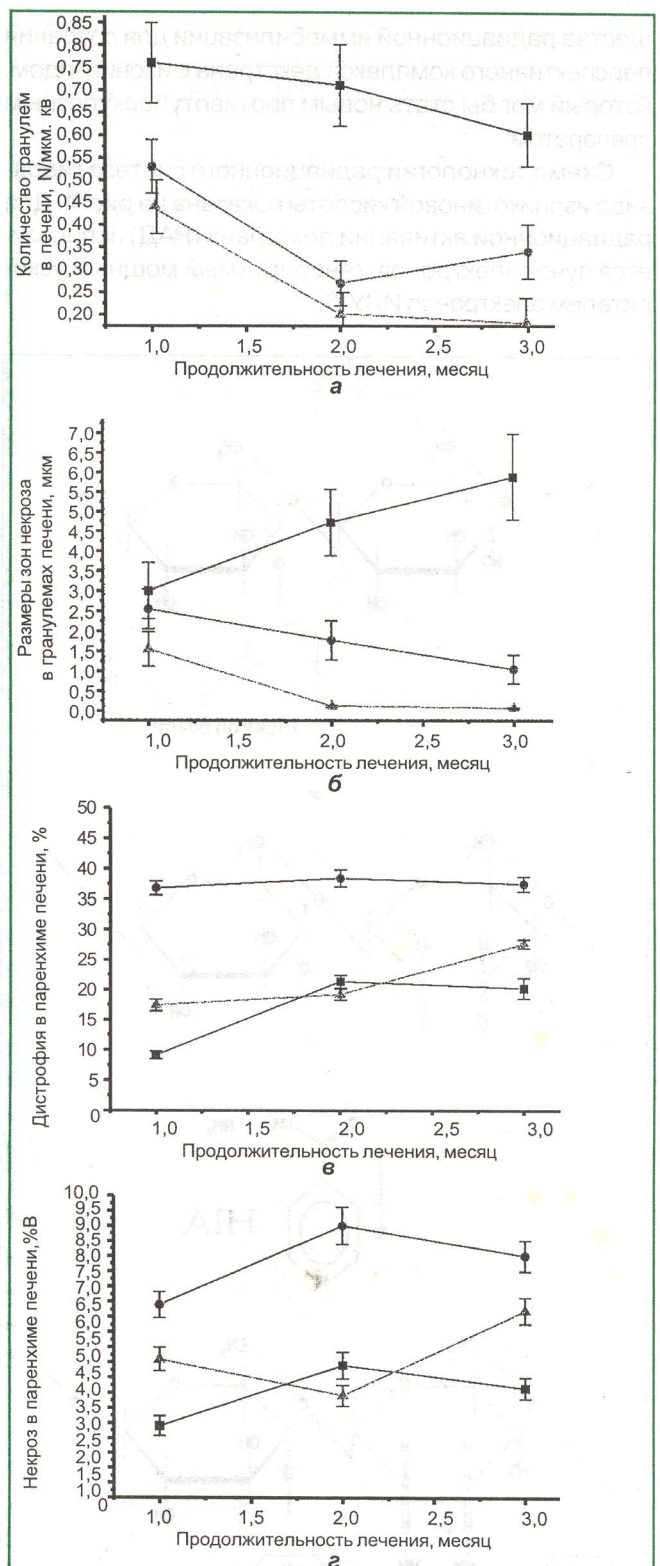
**Рис. 5. Маршруты свободного и иммобилизованного изониазида и их токсическое воздействие на печень:** ИД – изониазид иммобилизованный; И – свободный изониазид; ГЕП – гепатоцит; мкб – микобактерия; мик – микросома; пин – пиносома; лиз – лизосома; ЭК – эндотелиальная клетка; КК – клетка Купфера

в состав препарата «Изодекс», обеспечивают комплексное терапевтическое действие на всех уровнях локализации микобактерий туберкулеза. Этим достигается низкая токсичность препарата для клеток печени – гепатоцитов.

В настоящее время детально отработана технология получения «Изодекса» и изучены его лечебные и токсикологические свойства на стандартной экспериментальной модели туберкулеза у мышей.

Как показали исследования фармакологического действия, «Изодекс» в сравнении со свободным изониазидом обладает более выраженным лечебным эффектом. Об этом свидетельствуют более низкие значения размеров зон некроза в гранулах печени и большая скорость снижения численности специфических туберкулезных гранул в печени подопытных животных, зараженных *Micobacterium bovis*.

На рис. 6, а, б показаны результаты морфометрических исследований печени у экспериментальных животных (мышей, зараженных *Micobacterium bovis*) в процессе лечения туберкулеза различными формами изониазида. Численность гранул и размеры зон некроза в печени коррелируют с количеством живых микобактерий туберкулеза. Приведенные на рис. 6, в, г динамики изменения площадей некрозов и дистрофий в печени в процессе лечения экспериментального туберкулеза у мышей свидетельствуют о более низкой токсичности «Изодекса» по сравнению со свободным изониазидом. Как видно, изониазид обладает



**Рис. 6. Результаты морфометрических исследований печени зараженных мышей:** а – количество гранул в печени; б – размеры зон некроза в гранулах; в – дистрофия в паренхиме печени; г – доля некрозов в паренхиме печени. ■ Контроль ● Изониазид 1,0 мг ▲ «Изодекс» 1,0 мг



более выраженным повреждающим действием на паренхиму печени и в связи с этим лечение туберкулеза сопровождается значительным процентом некрозов и дистрофий в печени, у мышей. «Изодекс», в отличие от свободного изониазида, обладает значительно меньшей гепатотоксичностью (токсическим действием на печень), с чем соответственно связана меньшая площадь некрозов и дистрофий в печени. Мы полагаем, что это результат защитного действия декстрановой матрицы на клетки печени, и, вероятно, он распространяется и на свободную форму изониазида, присутствующую в «Изодексе».

Более выраженный лечебный эффект «Изодекса» связан с комплексным воздействием на возбудителя заболевания. Имобилизованная форма изониазида эффективно подавляет внутриклеточную популяцию микобактерий, а свободный изониазид действует на внеклеточную популяцию бактерий.

Уже завершены следующие работы.

□ Оработаны технологические параметры РАД. Исследован выход альдегидных групп в декстране в зависимости от радиационной нагрузки. В результате определен оптимальный радиационный режим, необходимый для активации декстрана, который не оказывает существенного влияния на молекулярно-массовое распределение в облучаемом полисахариде. Как показали исследования, выход альдегидных групп в декстране пропорционален поглощенной дозе и может быть существенно увеличен путем введения в облучаемый раствор небольшого количества перекиси водорода как сенсibilизатора радиационно-химического окисления органических веществ. Результаты исследований приведены в таблице.

□ Исследована кинетика связывания изониазида с РАД. Методом ионообменной хроматографии показано, что в реакцию с изониазидом вступает 50% альдегидных групп активированного декстрана. Наличие в конечном продукте 50% свободного изониазида, с клинической точки зрения, целесообразно, так как придает препарату комплексное терапевтическое действие. Комплекс изониазида с декстраном благодаря

специфическим свойствам матрицы обеспечивает внутриклеточную доставку для антимикобактериального воздействия на внутриклеточную популяцию возбудителя, а свободный изониазид обеспечивает антимикобактериальное воздействие на его внеклеточную популяцию.

Таким образом, радиационная технология с использованием пучка ускоренных электронов может рассматриваться как весьма перспективный метод в технологии получения новых пролонгированных противотуберкулезных препаратов. Полученные нами экспериментальные результаты свидетельствуют о высокой фармакологической эффективности и низкой токсичности изониазида, иммобилизованного на радиационно-активированном декстране. Отработка технологии активации декстрана и иммобилизации изониазида на примере получения препарата «Изодекс» показала реальные преимущества радиационных технологий перед технологиями химического синтеза, а именно:

- ▶ радиационная технология полностью исключает применение высокотоксичных химических активирующих реагентов;

- ▶ в процессе РАД не образуются токсичные примеси, и готовый продукт не нуждается в дорогостоящих и технологически сложных методах очистки;

- ▶ радиационная технология базируется на промышленных источниках ионизирующего излучения – ускорителях электронов и стационарных гамма-источниках. В связи с этим технология получения нового противотуберкулезного препарата может быть адаптирована к существующим промышленным фармацевтическим производственным схемам без дополнительных затрат и в короткие сроки;

- ▶ получаемый препарат имеет в несколько раз более низкую стоимость, чем его аналог, полученный методом химического синтеза.

Кроме того, процесс активации декстрановой матрицы и соответственно пришивка к нему изониазида может быть пластичным и управляемым за счет не только изменения режима облучения, но и введения сенсibilизирующих добавок.

Несомненно, что разработанная технология представляет собой основу для развития новых фармацевтических направлений в лечении других инфекционных заболеваний. Наши результаты практически показали, как эффективно объединение ученых-исследователей, работающих в различных областях фундаментальной и прикладной науки. Именно на стыке научных дисциплин возможно развитие принципиально новых технологий, которые так необходимы в динамичный XXI век.

№ варианта	Концентрация перекиси водорода в облучаемом растворе декстрана, %	Значение экстинкции, E
1	1	8,7
2	0,1	5,8
3	0,01	4,6
4 Контроль	0	2,2

## ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ФАРМАКОЛОГИИ. ГИДРОФИЛЬНЫЕ ГЕЛИ ПОЛИЭТИЛЕНОКСИДА И ИММОБИЛИЗОВАННЫЕ ФЕРМЕНТЫ

А.В.ТРОИЦКИЙ, Е.П.ГУЛЯЕВА, Л.А.БОГДАНОВА, Т.Н.БЫСТРОВА, Т.В.МАХНЕВА  
А.В.АРТАМОНОВ, Е.И.ВЕРЕЩАГИН, О.В.ГРИШИН, В.Н.КАРУНИН  
В.Л.АУСЛЕНДЕР, М.В.КОРОБЕЙНИКОВ

*Институт цитологии и генетики СО РАН  
Сибирский центр фармакологии и биотехнологии  
Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН*

На мировом фармацевтическом рынке композиционные средства для наружного применения занимают не менее 10% общего объема производимых лекарственных препаратов. Для изготовления этих средств традиционно используются такие гидрофобные основы, как вазелин, ланолин и растительные масла. Существенные недостатки гидрофобных мазевых основ: низкая газопроницаемость, приводящая при инфекционно-воспалительных процессах к развитию анаэробной микрофлоры, и несовместимость с большинством биологически активных веществ. С использованием гидрофобных основ практически невозможно получить мазевые формы некоторых лекарственных препаратов, например содержащих ферменты, так как они проявляют свою активность лишь в водной среде, и присутствие в композиции гидрофобной основы может вызвать необратимую денатурацию и потерю специфической активности.

Тем не менее интерес к разработке мазевых форм лекарственных препаратов, содержащих ферменты, в частности бактериальные протеиназы, постоянно растет. Такая тенденция связана с увеличением частоты гнойно-воспалительных процессов. Существующая в настоящее время лечебная тактика, основанная на использовании антибиотиков 4-го и 5-го поколений, позволяет лишь частично решить проблему гнойно-воспалительной патологии. Наиболее впечатляющие результаты достигаются при сочетании антибактериальной терапии с протеолитическими ферментами, которые осуществляют ферментативный лизис белков некротизированных тканей, являющихся питательной средой для развития патогенных микроорганизмов. Для создания мазей, содержащих в своем составе ферменты, гидрофильные гели на основе природных и синтетических полимеров являются наибо-

лее приемлемой композиционной основой. Гели на основе агара, хитозана, карбоксиметилцеллюлозы и т.д. обладают высокой гидрофильностью, газопроницаемостью и практически не влияют на активность растворенных в них ферментов. К недостаткам гелей на основе биополимеров следует отнести их низкую устойчивость к микробной деградации. С нашей точки зрения, органические полимеры и прежде всего полиэтиленоксиды являются наиболее перспективными для изготовления гидрофильных гелей медицинского назначения. Как известно, полиэтиленоксид отличается чрезвычайно высокой химической инертностью, он практически не подвергается биodeградации и практически безвреден для организма человека. Основная проблема при получении гидрофильных гелей полиэтиленоксида заключается в отсутствии технологически простых и доступных способов «сшивания» молекул полимера с образованием 3-мерной сетчатой структуры. Химические способы, основанные на использовании бифункциональных реагентов, сложны и требуют тщательной очистки образовавшегося геля от токсичных примесей. Мы полагаем, что наиболее перспективен физико-химический способ получения гелей полиэтиленоксида из его водных растворов с использованием технологии радиационной «сшивки».

В настоящее время известно, что при действии ионизирующего излучения на растворы некоторых полимеров образуется гель. Процесс радиационного гелеобразования характерен лишь для тех полимеров, у которых под действием ионизирующего излучения процессы сшивания преобладают над процессами деструкции. В целом направленность процесса радиационного гелеобразования в растворе и доза гелеобразования определяются как его свойствами, так и условиями облучения. К радиационно-сшивающимся полимерам относятся:

поливиниловый спирт, поливинилпирролидон, полиакриламид. Установлено, что при облучении водных растворов полиэтиленоксидов в присутствии кислорода они в основном подвергаются деструкции; при облучении в отсутствие кислорода – способны сшиваться.

Как показали наши исследования, облучение ускоренными электронами растворов полиэтиленоксида с молекулярной массой 1500 (далее сокр. ПЭО-1500) при мощности дозы 5 кГр/с и выше позволяет получать гель без удаления растворенного кислорода. Доза гелеобразования зависит от концентрации раствора полиэтиленоксида: при концентрации от 1 до 50% она составляет 40 – 420 кГр (рис. 1). Образующиеся гели представляют собой бесцветную стекловидную массу, гомогенизация которой позволяет получать текучие гели с динамической вязкостью 3 – 6 Па/с (в зависимости от концентрации раствора полиэтиленоксида). Разработанный нами способ получения геля защищен патентом России № 2026349.

Гель ПЭО-1500 с содержанием основного вещества 10% был использован нами для получения препарата «Стоматозим», представляющего собой протеазу *Bacillus subtilis*, иммобилизованную на полиэтиленоксиде и геле полиэтиленоксида.

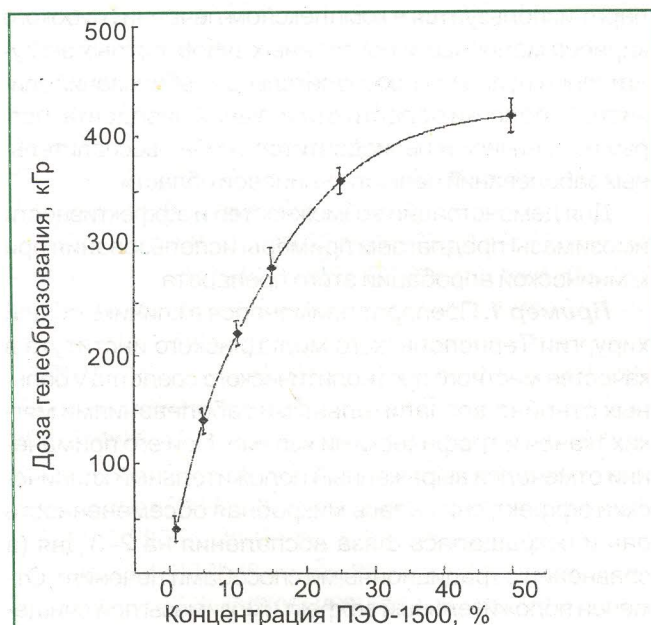
Исследование термостабильности стоматозима в отсутствие субстрата показало, что препарат обладает высокой термостабильностью. Как видно из результатов исследования (рис. 2), препарат сохраняет 37%-ную активность после прогревания при температуре 50 °С в течение 24 ч.

Стабилизирующий эффект геля полиэтиленоксида на протеазу, вероятно, связан с так называемым эффектом «двойной иммобилизации», при которой иммобилизованный на полиэтиленоксиде фермент дополнительно связывается в результате действия ионизирующего излучения с образующейся пространственной сеткой геля полиэтиленоксида. Образующийся при облучении гель создает вокруг протеазы своеобразную оболочку, стабилизирующую фермент. Не исключено образование при этом и дополнительных химических связей между полиэтиленоксидом, на котором первоначально был иммобилизован фермент, и пространственной сеткой геля полиэтиленоксида.

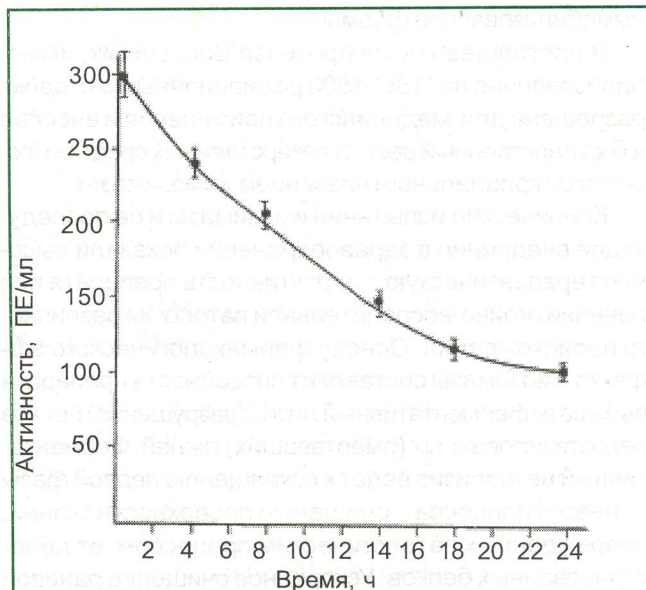
Такая двойная иммобилизация позволяет достигнуть высокой конформационной стабилизации протеазы и, как следствие, приобрести устойчивость к денатурационному воздействию повышенной температуры и автолизу.

На основе технологии радиационной иммобилизации на первом этапе создания стоматозима нами была получена жидкая форма лекарственного препарата, содержащего иммобилизованные протеазы, получившая название «имозимаза», которая имеет самостоятельное медицинское применение.

Схема процесса получения имозимазы представлена на рис. 3. Смесь фермента и полиэтиленоксида в растворе подвергается воздействию потока ускоренных электронов (доза менее 20 кГр), при этом происходят активация полимерного носителя и образование



**Рис. 1. Зависимость дозы гелеобразования от концентрации водного раствора ПЭО-1500**



**Рис. 2. Термостабильность (при 50 °С) протеазы *Bacillus subtilis*, иммобилизованной на ПЭО-1500 и включенной в гель ПЭО-1500 (стоматозим)**

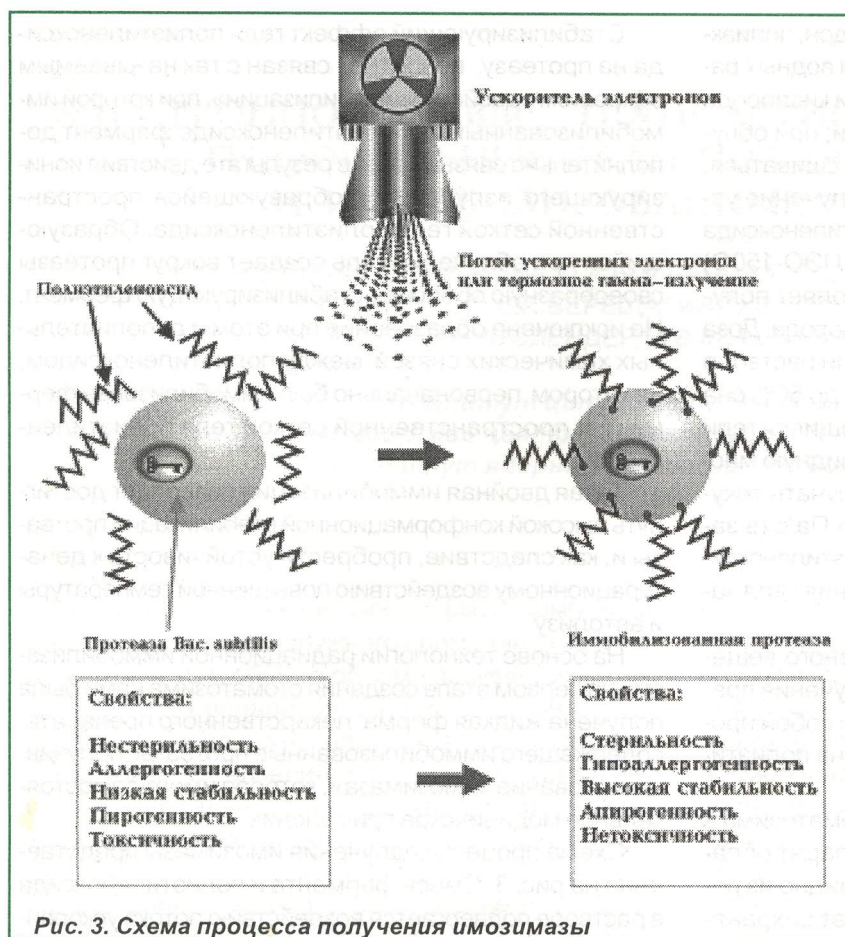


Рис. 3. Схема процесса получения имозимазы

при его взаимодействии с протеазой с образованием иммобилизованной формы.

В настоящее время протеаза *Bac. subtilis*, иммобилизованная на ПЭО-1500 радиационным методом, разрешена для медицинского применения и внесена в Государственный реестр лекарственных средств России под официальным названием «имозимаза».

Клинические испытания имозимазы и ее последующее внедрение в здравоохранении показали высокую терапевтическую эффективность препарата при лечении гнойно-воспалительной патологии различного происхождения. Основу фармакологического эффекта имозимазы составляет способность препарата вызывать ферментативный лизис (разрушение) белков некротизированных (омертвевших) тканей. Ферментативный некролизис ведет к сокращению первой фазы раневого процесса – очищению поверхности тканей, поврежденных патологическим процессом, от денатурированных белков. Ускоренное очищение раневой поверхности от нежизнеспособных тканей способствует появлению грануляций в более ранние сроки и ускоряет эпителизацию.

С 1987 г., когда было получено разрешение Фармакологического комитета на проведение клинических испытаний, до настоящего времени имозимаза апробирована во многих ведущих клиниках России. Наиболее широко имозимаза используется в хирургии, пульмонологии и стоматологии. В хирургической практике она применяется при лечении острых и хронических гнойно-некротических процессов различной этиологии и локализации: нагноившихся послеоперационных ран, гнойных ран после вскрытия абсцессов и флегмон, первично инфицированных ран, ожогов и отморожений различной степени тяжести, длительно незаживающих ран, трофических и лучевых язв, хронических остеомиелитов. В пульмонологии препарат применяется при лечении заболеваний, сопровождающихся выделением вязкой гнойной мокроты: острых и хронических трахеобронхитов, пневмонии, бронхоэктатической болезни, муковисцидоз и др. В ряде клинических ситуаций имозимаза высокоэффективна в качестве муколитического препарата для санации бронхов в предоперационном периоде в целях профилактики послеоперацион-

ных обтурационных осложнений. В стоматологии препарат используется в комплексном лечении глубокого кариеса молочных и постоянных зубов, острых экссудативных пульпитов, воспалительных заболеваний слизистой оболочки полости рта и тканей пародонта, острых и хронических периодонтитов, гнойно-воспалительных заболеваний челюстно-лицевой области.

Для демонстрации возможностей и эффективности имозимазы предлагаем примеры использования при клинической апробации этого препарата.

**Пример 1.** Препарат применялся в клинике общей хирургии Тернопольского медицинского института в качестве местного протеолитического средства у больных с гнойно-воспалительными заболеваниями мягких тканей и трофическими язвами. При его применении отмечался выраженный положительный клинический эффект, снижалась микробная обсемененность ран и сокращалась фаза воспаления на 2–3 дня (в сравнении с традиционными способами лечения). Отмечен положительный эффект имозимазы при очищении трофических язв нижних конечностей, возникших на фоне посттромбофлебитического синдрома.

**Пример 2.** На кафедре терапевтической стоматологии Новосибирского медицинского института данный препарат применялся при лечении больных с воспалительной патологией пародонта в сочетании с инсулинозависимым сахарным диабетом. Следует отметить, что воспалительные процессы у больных сахарным диабетом протекают особенно тяжело в связи с выраженными трофическими нарушениями в тканях. В настоящее время практически отсутствуют методы коррекции воспалительного процесса у таких больных, что в большинстве клинических случаев ведет к генерализации патологического процесса. В клинике препарат применялся для лечения 200 больных сахарным диабетом с патологией пародонта: гингивит (10%), генерализованный пародонтит легкой формы (30,6%), средней степени тяжести (33,3%), тяжелой формы (26,3%). Учитывая патогенез основного заболевания, всех больных лечили комбинированным способом с использованием на первых этапах лечения (до снятия острых воспалительных явлений) цинковой пасты, содержащей имозимазу, антибактериальный препарат (фуразолидон); на завершающих стадиях – цинковой пасты с фуразолидоном и инсулином. В контрольной группе больных для лечения применяли пасту аналогичного состава без имозимазы.

Анализ клинических результатов показал более выраженное положительное влияние на течение воспалительного процесса в тканях пародонта местного применения пасты с имозимазой. Так, при гингивите после одного–двух сеансов такого лечения исчезали все воспалительные явления: отек, гиперемия, значительно уменьшалась кровоточивость. Кроме того, использование препарата в комплексном лечении больных сахарным диабетом с патологией пародонта позволило сократить сроки местного лечения на 40% при гингивитах, на 29,5% при легких формах пародонтитов, на 33,3% при пародонтитах средней тяжести и 20% при тяжелых формах заболевания.

При лечении глубокого кариеса во всех клинических случаях был достигнут положительный эффект. Применение имозимазы и стоматозима позволило отказаться от машинной препаровки дна и стенок кариозной полости. Обработанный иммобилизованными протеазами нежизнеспособный дентин благодаря ферментативному лизису белков легко убирался зубным экскаватором, после чего зуб пломбировали по общепринятой методике. Лечение острых пульпитов проходило в два посещения; в третье посещение зубы пломбировали также по общепринятой методике. Уже однократное применение препаратов иммобилизованных протеаз приводило к устранению болевого синдрома, что свидетельствовало о купировании воспали-

тельного процесса в тканях пульпы зуба. Использование указанных препаратов в терапии обострившихся хронических периодонтитов позволило отказаться от применения других лекарственных средств и сократить сроки лечения до трех-четырех дней вместо обычных 10–15 дней.

На основе обобщенных результатов клинической апробации этих препаратов нами совместно с кафедрой детской стоматологии Новосибирского медицинского института выпущены в 1994 г. методические рекомендации для врачей-стоматологов «Применение иммобилизованных протеолитических ферментных препаратов имозимазы и стоматозима в стоматологической практике».

**Пример 3.** В Новосибирском филиале НПО «Фтизиопульмонология» применялось лечение имозимазой фибринозно-кавернозного туберкулеза легких в сочетании с хирургическими методами и специфической противотуберкулезной терапией. Введение препарата в полость каверны после кавернотомии позволяет очистить ее стенки от специфических гнойно-некротических масс, при этом грануляционная ткань начинает появляться уже на 2–3-й день применения препарата, а к исходу 6–7-х суток процесс грануляции завершается, одновременно закрываются устья бронхиальных свищей, которые в последующем облитерируются. На основе ингаляционного введения имозимазы и снижения вязкости мокроты и лизиса стенок каверн удалось разработать способ выявления микобактерий туберкулеза у абациллярных больных деструктивным туберкулезом легких, который позволяет скорректировать антибактериальную терапию и решить вопрос о необходимости оперативного вмешательства.

Кратко резюмируя результаты медико-биологических доклинических исследований и проведенной клинической апробации, можно сделать вывод о широком спектре терапевтической активности имозимазы в сочетании с ее низкой токсичностью и гипоаллергенностью. При этом экспериментально-клинически подтверждены некролитические, противовоспалительные, дезинтоксикационные иммуностимулирующие и другие фармакологические свойства препарата.

Разработанная нами электронно-лучевая технология получения фармакологических препаратов является лишь началом создания серии принципиально новых лекарственных средств на основе радиационно-модифицированных биологически активных веществ. Для всестороннего освоения этой новой технологии создается пилотное производство, которое будет являться базой для дальнейших работ как по производству новых препаратов, так и по освоению их опытно-промышленного серийного выпуска.

## ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СТЕРИЛИЗАЦИЯ МЕДИЦИНСКИХ ИЗДЕЛИЙ ОДНОКРАТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСКОРИТЕЛЕЙ ИЛУ

В.Л.АУСЛЕНДЕР, А.А.БРЯЗГИН, В.И.СЕРБИН, Л.А.ВОРОНИН

*Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН*

В последние годы большинство развитых стран использует электронно-лучевую обработку для стерилизации медицинских изделий как наиболее безопасный и экологически чистый из всех известных методов. Традиционно для стерилизации повсеместно используют ускорители электронов (энергия электронов 8–10 МэВ), облучая медицинские изделия непосредственно пучком электронов. Иногда стерилизацию осуществляют с использованием тормозного излучения электронов этой или несколько меньшей (~5 МэВ) энергии. Для указанного диапазона энергии электронов (с учетом установленных в каждой стране национальных регламентов) определены технологические параметры, обеспечивающие во всем объеме упаковки с изделиями поглощение дозы излучения, которая не менее требующейся для инактивации микроорганизмов. Одними странами этот нижний предел установлен на уровне 25 кГр, другими – на уровне 20 или даже 15 кГр.

При установлении технологических параметров облучения важно обеспечить не только превышение поглощенной дозы над нижним пределом, гарантирующим стерильность изделия после обработки, но и допустимую степень неравномерности поглощения излучения. По существу эта величина определяет верхний предел поглощенной дозы, который, как правило, назначается с учетом условия сохранения изделием после облучения механической прочности и работоспособности.

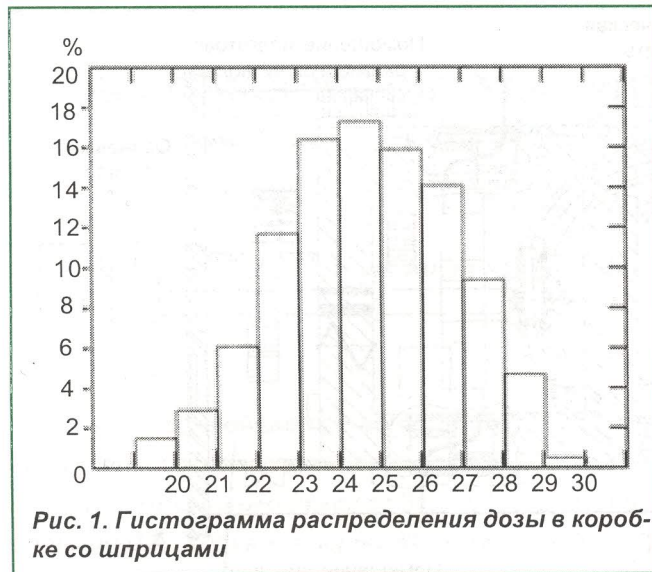
Располагая импульсным высокочастотным ускорителем ИЛУ-6 с максимальной энергией электронов 2,6 МэВ, мы, естественно, стали изучать возможность его использования для стерилизации шприцев разового пользования. Исследования показали, что для стерилизации одиночных шприцев этой энергии электронов вполне достаточно. Работа же с потребительской упаковкой, содержащей до 250 шприцев емкостью 2 и 5 мл, показала, что для стерилизации нужны соответствующая их ориентация в коробке и определен-

ные приемы облучения. В частности, наиболее равномерное распределение поглощенной дозы достигается, когда шприцы, упакованные в потребительскую упаковку (250 шприцев емкостью 2 или 5 мл вместе с иглами в картонной коробке размерами 420 x 21 x 120 мм), ориентированы во время электронно-лучевой обработки вертикально (или параллельно оси падения пучка). При таком облучении потребительской коробки с двух сторон электронами с энергией 2,48 МэВ коэффициент неравномерности дозы  $C = D_{\max}/D_{\min}$  по всему объему потребительской упаковки со шприцами оказался равным примерно 1,53 при минимальной дозе в 1,05 раза превышающей стерилизационную дозу (20 кГр).

Гистограмма распределения поглощенной дозы в коробке со шприцами, полученная в одном из таких экспериментов, приведена на рис. 1. Измерение выполнялось при использовании более 200 как обычных дозиметрических пленок типа ПДФ, так и специальных тестовых пленок, которые закладывались более или менее равномерно по всему объему пользовательской коробки с шприцами. Видно, что использованный рабочий режим дает поглощенную дозу во всем объеме коробки, превышающую 20 кГр. Это послужило основой для формулирования технологического регламента стерилизации электронным пучком – облучение должно выполняться с двух сторон в потребительской упаковке, и шприцы должны быть ориентированы вдоль направления электронного пучка.

Известно, что обычного дозиметрического контроля, основанного на измерении распределения поглощенной дозы в обрабатываемых изделиях, недостаточно для оценки надежности стерилизации шприцев. Режим стерилизации должен быть проверен биологическими методами с исследованием инактивации микробов после электронно-лучевой обработки.

Биологическое исследование осуществлялось с использованием культур специальных радиационно-устойчивых наборов штаммов микробов. Уровень инак-



**Рис. 1. Гистограмма распределения дозы в коробках со шприцами**

тивации этих микробных культур в зависимости от поглощенной дозы очень хорошо изучен, поэтому он служит своего рода биологическим дозиметром. Биологические тесты показали, что двухстороннее облучение шприцев в потребительской упаковке гарантирует соблюдение общемирового стандартного уровня безопасности  $10^6$  (с запасом).

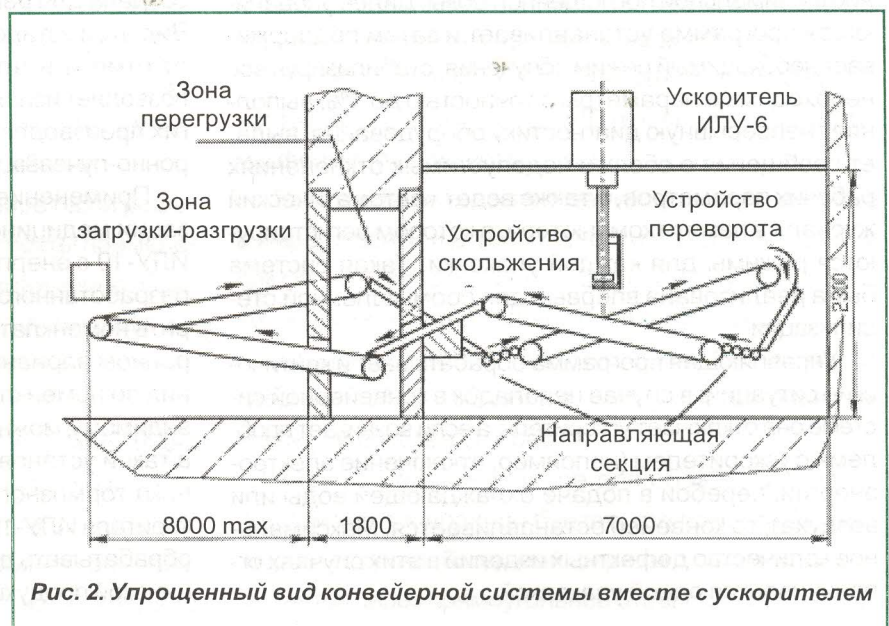
Технологический регламент процесса электронно-лучевой стерилизации шприцев с иглками, утвержденный Минздравом РФ, предусматривает возможность стерилизации электронным пучком, генерируемым ускорителем электронов ИЛУ-6 (с энергией электронов 2,6 МэВ), стерилизация должна выполняться с двух сторон (двухстороннее облучение) с неравномерностью примерно 50%. С учетом этого регламента в ИЯФ им. Г.И.Будкера на основе импульсного линейного ускорителя ИЛУ-6 был разработан и изготовлен автоматизированный комплекс для стерилизации одноразовых медицинских шприцев. Этот комплекс установлен на предприятии «Ижевский мотозавод».

Основной проблемой, которую надо было решить при проектировании технологической линии, была организация транспортировки обрабатываемых изделий в зону облучения и из нее. Для этого служит специальная конвейерная система, которая обеспечивает, наряду с транспортировкой коробок со шприцами, также и радиационную безопасность стерилизации.

Упаковки со стерилизуемыми шприцами подаются в зону облучения конвейером с компьютерным управлением, специально созданным для работы в условиях воздействия ионизирующего излучения. Конвейер обеспечивает двухстороннее облучение упаковок со шприцами, необходимое для равномерного распределения поглощенной дозы по объему. Комплекс сертифицирован Минздравом РФ и стерилизует в настоящее время 120 млн шприцев в год (количество продукции определяется мощностью производства).

Упрощенный вид конвейерной системы показан на рис. 2. Она состоит из трех отдельных конвейеров, несущие ленты которых выполнены из коррозионно-стойкой стальной сетки и приводятся в движение через барабаны.

Первый подающий конвейер (его наклон около  $15^\circ$ ) перемещает упаковки со шприцами из склада продукции в зону облучения через отверстие в биологической защите. Металлический барабан обеспечивает дополнительную радиационную защиту. Затем упаковки соскальзывают по металлическому склизу и попадают на направляющие ролики второго (подпучкового) конвейера, на двух несущих лентах которого упаковки транспортируются под пучком. Обе ленты приводятся в движение одним мотором с общим приводом. Направляющие ролики подпучкового конвейера расположены в его начале и обеспечивают правильное заполнение (коэффициент заполнения можно регулировать, но обычно максимальная эффективность достигается, когда он близок к 1). Обе ленты подпучкового конвейера имеют наклон около  $10^\circ$ , причем пер-



**Рис. 2. Упрощенный вид конвейерной системы вместе с ускорителем**

вая лента перемещает упаковки под пучком один раз, в конце ленты упаковки падают вниз с одновременным переворачиванием и попадают на вторую ленту конвейера. Переворачивающее устройство снабжено склизом с воздушной подушкой. Затем эта лента перемещает уже перевернутые упаковки под пучком второй раз, что обеспечивает двустороннее облучение. Упаковки на обеих лентах проходят под пучком на равном расстоянии от фольги выпускного окна ускорителя (расстояние регулируется). Затем упаковки по склизу соскальзывают через выходное отверстие защиты и попадают на направляющие ролики третьего конвейера, который перемещает их на склад готовой продукции.

Поскольку мощность пучка достаточно велика и может повредить конвейер, к центральной части подпучкового конвейера подведено водяное охлаждение. Также имеется отдельный водоохлаждаемый коллектор пучка, используемый для защиты конвейера во время регулировки и настройки установки.

Установка полностью автоматизирована. Компьютерная система на основе IBM PC управляет энергией, током пучка, частотой следования импульсов, а также системой транспортировки облучаемых изделий. Оператору для настройки нужно ввести только значение минимальной поглощенной дозы. Далее управляющая программа устанавливает и затем поддерживает необходимый режим облучения, стабилизируя все необходимые параметры с точностью до 1%, выполняет непрерывную диагностику оборудования, выдает сообщения о сбоях и недопустимых отклонениях рабочих параметров, а также ведет «автоматический журнал» в памяти компьютера, в котором регистрируются режимы для каждой упаковки. Такая система была реализована впервые для промышленной стерилизации.

Управляющая программа обрабатывает и критические ситуации: в случае неполадок в конвейерной системе она отключает ускоритель, а если возникает проблема с ускорителем (например, отключение электроэнергии, перебои в подаче охлаждающей воды или воздуха), то конвейер останавливается. Максимальное количество дефектных изделий в этих случаях ограничивается одной упаковкой.

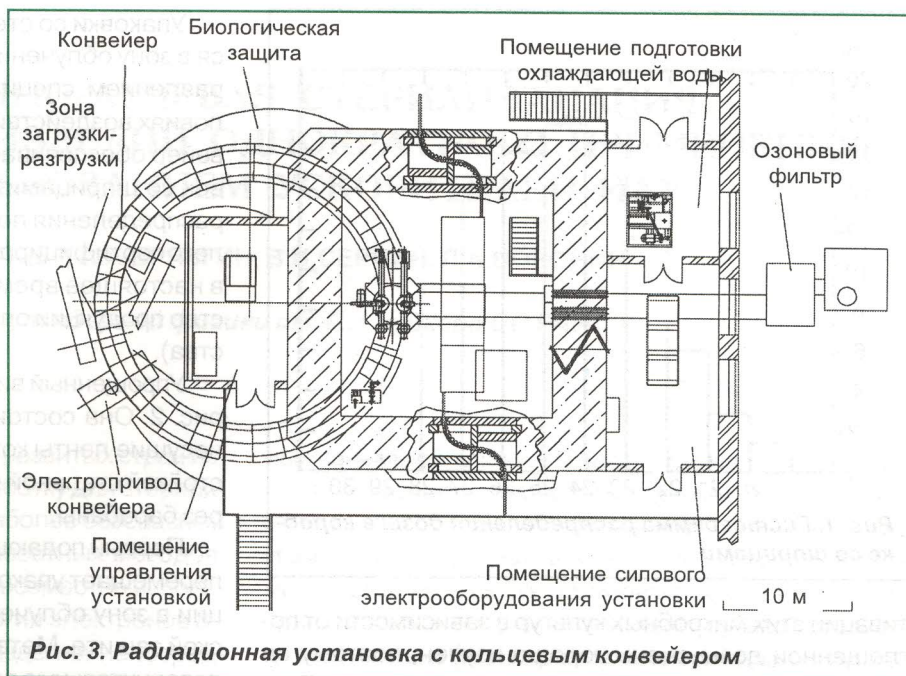


Рис. 3. Радиационная установка с кольцевым конвейером

Технологическая линия позволяет стерилизовать 90 000 одноразовых шприцев (с иглками) в час (в потребительских упаковках). Производительность установки (при одной рабочей смене в день) составляет более чем 150 млн изделий в год.

Такая же технология облучения на основе ускорителя ИЛУ-6 используется в установке, работающей в Киеве.

Для стерилизации медицинских изделий однократного применения возможно использовать и радиационную установку на базе ускорителя ИЛУ-6 с использованием кольцевого конвейера, которая вначале была создана для решения других технологических задач. Вид этой установки в плане показан на рис. 3. Следует отметить, что запас мощности электронного пучка позволяет использовать ее и для осуществления других производственных процессов на основе электронно-лучевых технологий.

Применение в описанной установке для стерилизации медицинских изделий ускорителя электронов ИЛУ-10 с энергией электронов до 5–5,5 МэВ, также разработанного в ИЯФ, позволит значительно расширить номенклатуру облучаемых изделий уже в электронном варианте его использования. Все ограничения по номенклатуре обрабатываемых изделий, по видимому, можно снять полностью, если использовать в такой установке этот ускоритель в качестве источника тормозного излучения. Большая мощность ускорителя ИЛУ-10 позволяет даже в режиме конверсии обрабатывать достаточно большое количество медицинской продукции однократного применения.



## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ ДЛЯ РАДИАЦИОННОЙ ДЕЗИНСЕКЦИИ ЗЕРНА

Р.А.САЛИМОВ, В.Г.ЧЕРЕПКОВ

*Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН*

Одной из важнейших причин потерь зерна при хранении является его повреждение насекомыми-вредителями, которые уничтожают от 5 до 10% зерна [Тривятский Л.А. *Хранение зерна*. М.: Колос, 1975. С. 6]. Борьба с ними в основном ведется химическим способом – путем обработки зерна и хранилищ ядохимикатами. Этот метод имеет ряд существенных недостатков, а именно: загрязнение окружающей среды; наличие в зерне некоторого остаточного уровня ядохимикатов; вредные условия труда операторов; неэффективность действия метода на скрытую форму зараженности и др. В результате поисков других методов дезинсекции зерна радиационный способ относят к числу наиболее перспективных.

При радиационной дезинсекции зараженное продовольственное зерно облучается ионизирующим излучением до стерилизующих доз, при которых прекращается размножение насекомых, а также значительно сокращается продолжительность их жизни. При этом в зерно не вводятся никакие вредные вещества, оно не теряет свои пищевые качества и готово к употреблению непосредственно после обработки.

К 1960 годам в нашей стране и в мире были решены биологические и гигиенические аспекты применения радиационного метода дезинсекции зерна. Применение сдерживалось из-за отсутствия мощных источников излучения, способных облучать в потоках сотни тонн зерна в час.

Институт ядерной физики СО РАН в начале 1970-х годов разработал серию промышленных ускорителей электронов типа ЭЛВ с мощностью пучка до 100 кВт [Ауслендер В.Л., Салимов Р.А. *Атомная энергия*, 1978. Т. 44. Вып. 5. С. 403]. Поэтому уже к середине

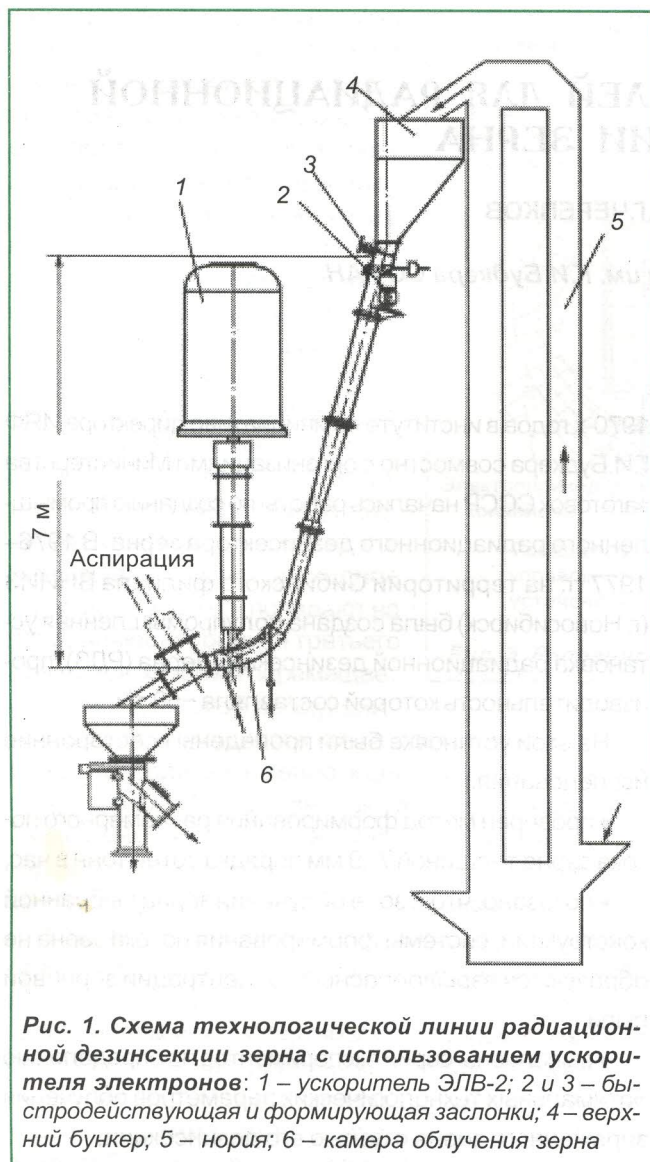
1970-х годов в институте по инициативе директора ИЯФ Г.И.Будкера совместно с организациями Министерства заготовок СССР начались работы по созданию промышленного радиационного дезинсектора зерна. В 1976–1977 гг. на территории Сибирского филиала ВНИИЗ (г. Новосибирск) была создана полупромышленная установка радиационной дезинсекции зерна (РДЗ), производительность которой составляла ~50 т/ч.

На этой установке были проведены всесторонние исследования:

- проверен метод формирования равномерного потока зерна толщиной 7–9 мм порядка сотен тонн в час;
- показано, что в зоне облучения зерна выбранной конструкции, системы формирования потока зерна не образуются взрывоопасные концентрации зерновой пыли;
- выполнены серии экспериментов по определению оптимальных технологических параметров облучения зараженного зерна с целью его дезинсекции;
- проверена в производственных условиях надежность работы ускорителя ЭЛВ и новых блоков системы формирования потока зерна.

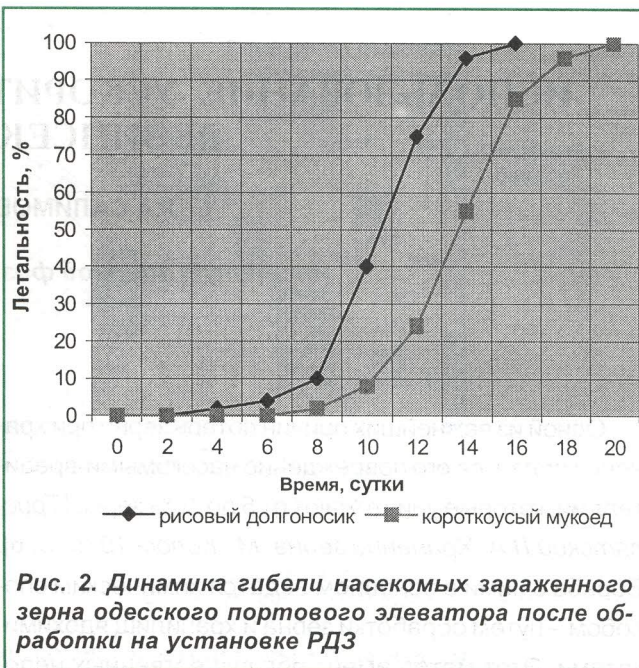
Результаты этих исследований позволили впервые в мире создать и в 1980 г. ввести в эксплуатацию на одесском портовом элеваторе установку РДЗ, состоящую из двух технологических линий (каждая производительностью 200 т/ч) [Закладной Г.А. *Атомная энергия*, 1982. Т. 52. Вып. 1. С. 57]. Упрощенная схема линии показана на рис. 1.

Зерно, предназначенное для обработки, норией поднимается в верхний бункер, где поток зерна расширяется до необходимой ширины и самотеком просыпается через прямоугольное отверстие, образован-



**Рис. 1.** Схема технологической линии радиационной дезинсекции зерна с использованием ускорителя электронов: 1 – ускоритель ЭЛВ-2; 2 и 3 – быстродействующая и формирующая заслонки; 4 – верхний бункер; 5 – нория; 6 – камера облучения зерна

ное между кромкой формирующей заслонки и дном канала разгона зерна. Таким образом формируется поток зерна с равномерной толщиной. При необходимости его подача может быть прекращена с помощью быстродействующей заслонки, которая располагается непосредственно под формирующей заслонкой. В канале разгона зерно ускоряется под действием силы тяжести и по криволинейному участку канала направляется в камеру облучения, по дну которой оно движется равномерным потоком толщиной 7–9 мм со скоростью ~6 м/с. Здесь зерно и вредители облучаются пучком ускоренных электронов с энергией 1,5 МэВ



**Рис. 2.** Динамика гибели насекомых зараженного зерна одесского портового элеватора после обработки на установке РДЗ

(ускоритель ЭЛВ-2) и получают дозу от 20 до 40 крад (0,2–0,4 кГр). Для охлаждения стенок камеры облучения применяется «водяная рубашка». Аспирация зерновой пыли исключает образование в камере облучения ее взрывоопасной концентрации.

Технологическими линиями дезинсектора управляют два оператора.

Радиационный дезинсектор зерна, запущенный в эксплуатацию в 1980 г., является действующим узлом на одесском портовом элеваторе до настоящего времени. На нем обработано свыше 7 млн тонн зерна.

Зависимость динамики гибели насекомых зараженного зерна одесского портового элеватора после обработки на установке РДЗ показана на рис. 2 (энергия электронов 1,4 МэВ, доза облучения 20 крад, производительность обработки 170 т/ч). Как видно на рисунке, полная гибель насекомых наступает через три недели после облучения.

В настоящее время специалисты ИЯФ СО РАН участвуют в проектировании установки РДЗ, состоящей из двух технологических линий (каждая производительностью 500 т/ч), для одного из южных портов Китая. В этом проекте предполагается использовать ускорители ЭЛВ-8.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ В ПРОЦЕССАХ ОЧИСТКИ МУНИЦИПАЛЬНЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД

**Б.М.ВАНЮШКИН, Н.К.КУКСАНОВ, В.А.ИВАНЧЕНКО,  
В.А.ГОРБУНОВ, Г.А.СПИРИДОНОВ**

*Институт технической физики и автоматизации Минатома РФ  
Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН  
Новосибирский государственный университет  
Всероссийское проектно-конструкторское, научно-исследовательское  
и технологическое объединение Минатома РФ*

В связи с непрерывной интенсификацией промышленного и сельскохозяйственного производства возник целый ряд экологических проблем, связанных с обеззараживанием и обезвреживанием больших объемов сточных вод и их осадков на промышленных и коммунальных очистных сооружениях, очисткой отходящих газов заводов и электростанций, а в ряде случаев и с водоподготовкой. Все это вынуждает непрерывно совершенствовать существующие методы и системы очистки, а также параллельно разрабатывать новые процессы очистки.

Развитие радиационной химии и разработка мощных ускорителей электронов – интенсивных источников излучения высокой энергии – создали предпосылки для использования радиационных методов в системах водоподготовки и очистки воды. Известно, что излучения высокой энергии способны разрушать многие вредные химические вещества и губительно действовать на патогенную микрофлору. К тому же радиационная обработка, как правило, не требует введения дополнительных реагентов. Поэтому такой метод очистки наиболее экологически перспективен в сравнении с другими. Его использование не исключает применения и других методов, более того, его привлекательные качества часто проявляются именно в сочетании с другими приемами очистки.

Сточные воды относятся к разбавленным растворам. При их облучении имеет место не столько непосредственное воздействие излучения высокой энергии на содержащиеся в воде загрязнения и патогенные микроорганизмы, сколько воздействие на них образующимися в воде высокоактивными продуктами ее радиолиза. Эти продукты радиолиза ( $H^+$ ,  $OH^-$ ,  $H_3O^+$ ,  $H_2O_2$  и гидратированные электроны) либо полностью разрушают растворенные в воде сложные химические

соединения, либо преобразуют их в простые нетоксичные вещества, которые легко поддаются дальнейшей доочистке обычными методами (химическими, биологическими, флотационными и т.п.).

Радиационный метод очистки сточных вод представляется универсальным с точки зрения его возможностей. Он позволяет разрушать вредные органические и неорганические соединения, включая такие биологически стойкие и сильно токсичные вещества, как пестициды, поверхностно-активные вещества, цианиды, фенол, различные красители, соли тяжелых металлов и др. Благодаря воздействию ионизирующего излучения ускоряется седиментация и фильтрация суспензий, угнетается развитие микрофлоры. Очень важен стерилизующий эффект воздействия излучения высокой энергии. Электронно-лучевая обработка может быть использована для обеззараживания и обезвреживания природной воды для общехозяйственных нужд и питья, сточных муниципальных вод и сточных вод промышленных предприятий, а также для обработки осадков сточных вод промышленных предприятий, которые сильно различаются по количеству и составу содержащихся в них вредных веществ и патогенных микроорганизмов. Уровень их радиационной обработки должен устанавливаться с учетом как этих показателей, так и требований нормативных документов по качеству воды различного назначения.

Обработка природной воды дозой 0,3–0,5 кГр резко снижает содержание в ней патогенных микроорганизмов и во многих случаях позволяет привести к норме такие ее показатели, как цветность, запах. Обработка такой дозой улучшает и привкус воды. В табл. 1 показано качественное изменение под воздействием облучения (доза 0,3–0,4 кГр) ряда показателей муниципальных сточных вод (г. Петродворец). Данные ис-

Таблица 1

**Изменение санитарно-гигиенических показателей муниципальных сточных вод (г. Петродворец) под воздействием облучения их электронами высокой энергии**

Санитарно-гигиенические показатели	
Исходная вода после станции аэрации	Вода после обработки электронным пучком
Содержит очень большое количество патогенных микроорганизмов	Содержит значительно меньшее количество патогенных микроорганизмов
Раздражает слизистую оболочку глаз	Не токсична для гидробионтов Не раздражает кожу
Разрушает печень животных (при поении)	Не разрушает печень животных
Может содержать мутагены	Не содержит как новых, так и ранее имевшихся в воде мутагенов
	Имеет лучшие санитарно-гигиенические показатели в целом по сравнению с исходной водой

Таблица 2

**Количественные показатели воздействия электронного пучка на образцы муниципальной воды**

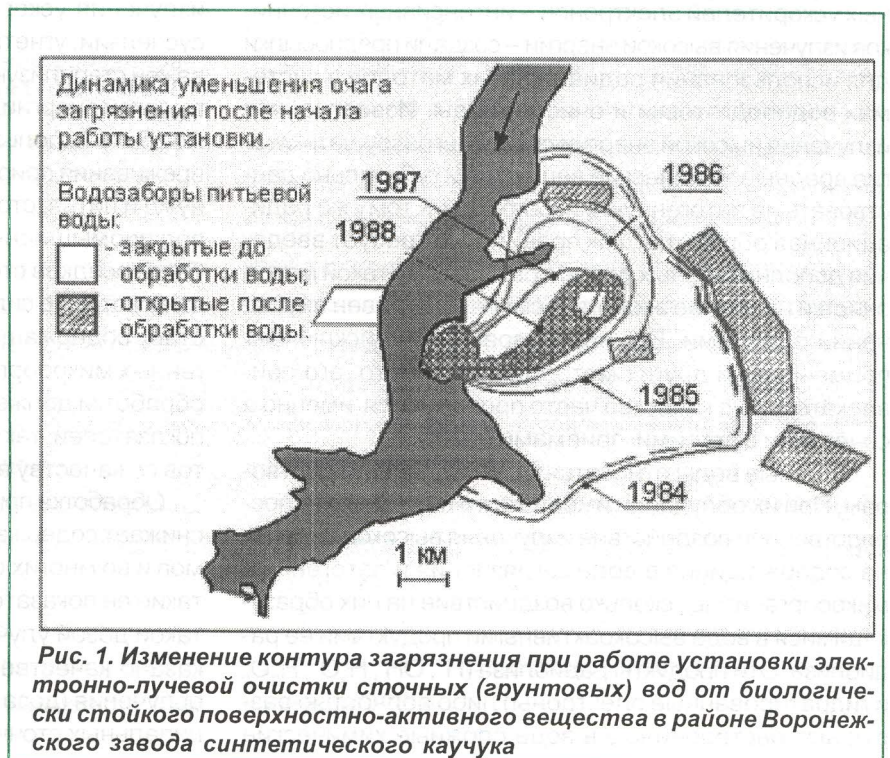
Показатели	До облучения	После облучения
Химическое потребление кислорода, мг O <sub>2</sub> /л	13–28	5,2–5,8
Биологическое потребление кислорода, мг O <sub>2</sub> /л	3,5–5,0	0,5–1,0
Содержание патогенных микроорганизмов (E-coli), кл/л	100–2000 800–7000	1–2 <13
pH, не более	8,0	7,6
Содержание биологически стойких поверхностно-активных веществ, мг/л	1,0	0,2

При вводе мономеров этот результат достигается вследствие захвата загрязнения нерастворимым осадком образующегося при облучении полимера. Для снижения необходимых доз используют комбинации радиационного метода очистки с традиционными методами, например с флотацией. Хорошие результаты по очистке промышленных сточных вод в ряде случаев достигаются при сочета-

следования выполнены сотрудниками ВНИИ технической физики и автоматики Минатома России при участии ряда специализированных организаций. Заметим, что при дозе 0,4 кГр ускоритель электронов мощностью 100 кВт может обработать до ~ 15 тыс. м<sup>3</sup> воды в сутки.

Количественные показатели этой же воды до и после ее обработки электронным пучком приведены в табл. 2.

Содержащиеся в промышленных сточных водах ядовитые и трудно разлагаемые обычными методами вещества требуют, как правило, более высоких поглощенных доз для разрушения (от 1 до 20 кГр и более). Использование в небольших количествах тех или иных добавок к воде (например, мономеров, перекиси водорода и др.) понижает уровень поглощенных доз.



**Рис. 1. Изменение контура загрязнения при работе установки электронно-лучевой очистки сточных (грунтовых) вод от биологически стойкого поверхностно-активного вещества в районе Воронежского завода синтетического каучука**

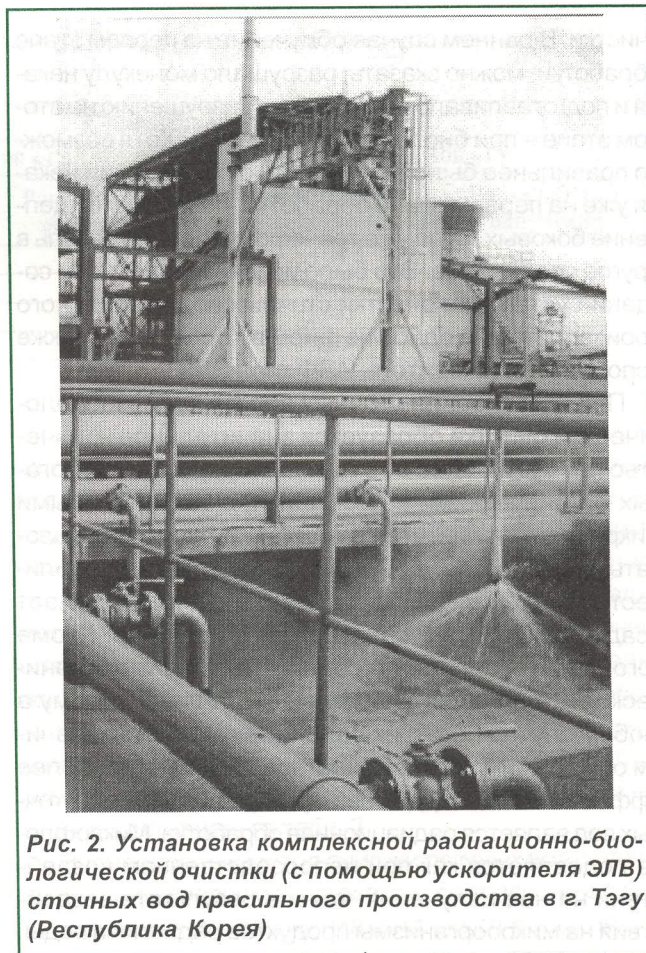
нии радиационного метода обработки с биологическими системами очистки.

Сочетание радиационного метода обработки с биологическим положено в основу одной из первых в нашей стране (да и в мировой практике) промышленной установки очистки сточных вод Воронежского завода синтетического каучука от стойкого поверхностно-активного вещества (некаля). Необходимость создания такой установки была вызвана тем, что в результате многолетней закачки в грунт сточных вод завода (из-за невозможности разложения некаля биологической системой очистки) была заражена и оказалась непригодной для водозабора значительная часть территории города, прилегающая к водохранилищу. Установка электронно-лучевой очистки сточных вод на базе ускорителя электронов серии ЭЛВ была введена в действие в 1984 году, а к концу 1980-х годов она продемонстрировала высокие эффективность используемой радиационной технологии и работоспособность. Вода из скважин сначала подвергалась обработке электронным пучком по специальной методике, а затем проходила доочистку в обычной биологической системе. По этой методике облучению на первом этапе обработки подвергалась не собственно вода, а слой пены на ее поверхности, который образовывался при барботировании воздуха через слой воды и содержал основную массу некаля.

Первоначально площадь загрязнения составляла примерно 40–50 км<sup>2</sup>. Объем загрязненных стоками грунтовых вод не был определен точно, но предполагалось, что он составлял несколько десятков миллионов кубометров. Максимальное содержание некаля в воде составляло в отдельных местах до 150 мг/л.

После завершения пусконаладочных работ установка работала по 7–7,5 тыс. ч/год сначала на базе одного, а с 1988 г. – двух ускорителей электронов, обрабатывая в зависимости от концентрации некаля в воде от 5 до 35 тыс. м<sup>3</sup> воды в сутки (при двух ускорителях). После 1988 г. при работе этой установки единого поля заражения уже не существовало. Оно разбилось на отдельные пятна с повышенной концентрацией некаля. Для ликвидации этих пятен потребовалась дополнительная почти семилетняя работа установки. К концу этого периода установка находилась в работе более 10 лет и сохраняла свою работоспособность.

Приобретенный при разработке первой промышленной установки опыт организации и осуществления комплекса санитарно-гигиенических исследований и полученные результаты убедительно продемонстрировали не только эффективность, но и безопасность использования электронно-лучевого метода обработки



**Рис. 2. Установка комплексной радиационно-биологической очистки (с помощью ускорителя ЭЛВ) сточных вод красильного производства в г. Тэгу (Республика Корея)**

воды при сочетании радиационной и биологической очистки, высокую работоспособность ускорителей электронов ИЯФ.

Необходимо также отметить, что разложению некаля в большой степени должно было способствовать значительное содержание в облучаемой пене озона, образующегося в результате радиолиза воздуха. Озон сам по себе является сильным окислителем, в комбинации же с ионизирующим излучением его использование дает так называемый синергический эффект: результат совместного воздействия двух факторов (в данном случае озона и излучения) значительно превышает сумму результатов воздействия каждого из них порознь. Отметим также, что в Воронеже имело место не разрушение всего остова молекулы некаля (это требовало поглощения большой дозы излучения), а лишь отщепление от нее боковых (по отношению к нафталиновому каркасу) групп атомов (бутильной группы и сульфогруппы). Это требовало значительно меньшей дозы облучения. С отщеплением данных групп оставшаяся часть молекулы уже могла быть переработана в системе биологической

очистки. В данном случае облучение на первом этапе обработки, можно сказать, разрушало молекулу некаля и подготавливало ее к полному разрушению на втором этапе – при биологической очистке. Хотя возможно правильнее было бы говорить о разрушении некаля уже на первом этапе обработки, поскольку отщепление боковых групп уже трансформировало некаль в другое соединение. Это было использовано и при создании установки очистки сточных вод красильного производства на одной из фирм в Корее. В ней также использован ускоритель ИЯФ типа ЭЛВ.

При отстаивании сточных вод и в ходе их биологической очистки образуется значительное количество (до 1% и более от объема стока) осадков, богатых органическими веществами, а также ценными микроэлементами, что позволяет частично использовать их в качестве удобрений. Однако большое количество бактерий, в том числе и патогенных, делает осадки опасными в санитарном отношении. Кроме того, такие осадки могут содержать вредные органические соединения и тяжелые металлы. Поэтому в любом случае перед их дальнейшим использованием они должны обезвреживаться. Одним из наиболее эффективных методов обеззараживания осадков сточных вод является радиационная обработка. Микрофлора подавляется как при непосредственном воздействии на нее излучения, так и в результате воздействия на микроорганизмы продуктов радиолиза воды. Воздействие излучения значительно улучшает фильтруемость осадков сточных вод, что облегчает их обезвреживание. Обеззараживание осадков с использованием излучения высокой энергии может быть осуществлено при дозах облучения 3–4 кГр, и лишь при очень высокой степени обсемененности и большом содержании вредных органических соединений могут потребоваться дозы облучения до 10 кГр и более. Естественно, что при повышенных дозах следует ожидать и сокращения производительности установок, что не столь уж катастрофично, так как при этом и объем обрабатываемого осадка в 50–100 раз меньше объема воды, поступающей на очистные сооружения.

Сложнее обстоит дело с очисткой сточных вод от вредных тяжелых металлов. В настоящее время проблема очистки сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов, особенно таких токсичных, как  $\text{Cr}^{6+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  и другие, является чрезвычайно актуальной. Ионы хрома  $\text{Cr}^{6+}$  содержатся в сточных водах многих десятков производств. Соединения шестивалентного хрома являются очень сильными окислителями. При попадании в организм они оказывают вредное воздействие на все органы и кожные покровы, стимулируют

канцерогенные процессы. При попадании в почву происходит омертвление флоры и уничтожение практически всех бактерий, в том числе и используемых на станциях биологической очистки сточных вод. Соединения  $\text{Cr}^{6+}$  сами по себе не разлагаются, т.е. происходит их накопление. Обычно для удаления тяжелых металлов из сточных вод применяются химические методы, которые обладают значительным недостатком – происходит вторичное загрязнение сточных вод и выделяемых осадков используемыми реагентами.

В недалеком прошлом нерешенность этой задачи послужила одной из основных причин прекращения работ по созданию установки для обеззараживания осадков сточных вод и получению кормовых добавок и удобрений на основе стоков Первомайского химкомбината (Украина). Вредные тяжелые металлы лучше всего удалять на локальных установках очистки сточных вод, не допуская их попадания в общие муниципальные системы. Для этого могут быть использованы любые методы, в которые вовлекаются относительно небольшие объемы сточных вод. Отметим два приема, которые представляются нам наиболее интересными при использовании излучения высокой энергии.

Первый из этих методов связан с использованием излучения для производства волокнистых ионитов, которые, как показывают исследования многих организаций и, в частности, Института физико-органической химии Белорусской академии наук, могут быть эффективно использованы для очистки сточных вод и их осадков от ионов тяжелых металлов. В динамических условиях их емкость по сорбции ионов хрома может достигать момента проскока 150 мг хрома на 1 г их собственного веса. Они способны сорбировать многие тяжелые металлы, включая хром, кобальт, медь, ртуть и др. Важные технологические достоинства волокнистых ионитов вытекают, как отмечает это академик В.С. Солдатов (имеется в виду его статья «Волокнистые иониты – перспективные сорбенты для выделения ионов тяжелых металлов», опубликованная в Бюллетене химического общества им. Менделеева, 1990), уже из самой их формы. Они состоят из тонких нитей одинакового диаметра (2–30 мкм), что обеспечивает высокую скорость протекания сорбционных процессов, которая на один–два порядка выше, чем на гранульных, с обычно применяемой в процессах очистки дисперсностью 0,25–1 мм (это особенно важно для работы с разбавленными растворами). Из таких нитей могут создаваться в текстильной промышленности как тканые, так и нетканые материалы. Подходящими формами ионитов могут быть сети, конвейерные ленты, плавающие, а также закрепленные под

Таблица 3

**Воздействие электронного пучка на водные растворы, содержащие ионы хрома**

Вид раствора мг/л (моль/л)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , мг/л (моль/л)	Концентрация Cr <sup>6+</sup> , мг/л			
		Доза 100 кГр		Доза 300 кГр	
		Исходный раствор	Раствор после облучения	Исходный раствор	Раствор после облучения
K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> 294 (10 <sup>-3</sup> )	15,8 (10 <sup>-3</sup> )	104	0,02	104	0
K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> 294 (10 <sup>-3</sup> )	158 (10 <sup>-2</sup> )	104	0,04	104	0
K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> 294 (10 <sup>-2</sup> )	158 (10 <sup>-2</sup> )	1040	0,01	1040	0
K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub> 194 (10 <sup>-3</sup> )	15,8 (10 <sup>-3</sup> )	520	0,007	520	0
K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub> 194 (10 <sup>-3</sup> )	158 (10 <sup>-2</sup> )	520	0,05	520	0

водой или в колоннах маты, периодически извлекаемые для регенерации, и др. Для создания волокнистых ионитов используются различные приемы. Академик В.С.Солдатов так описывает радиационный метод получения волокнистых ионитов. Сначала с использованием обычной промышленной технологии производится полипропиленовое волокно. Затем на этом волокне путем излучения высокой энергии осуществляется радиационная привитая сополимеризация стирола и дивинилбензола, благодаря чему в волокне сразу же создается трехмерная пространственная сетка, и в дальнейшем сшивания волокна уже не требуется. И наконец, с помощью традиционных методов на полученном волокне фиксируются различные (в зависимости от назначения) активные группы, которые ответственны за сорбцию ионов различных тяжелых металлов из воды.

Примечательно, что волокнистые иониты могут быть использованы для создания как локальных закрытых систем очистки воды с использованием устройств типа ионообменных колонн, так и открытых (бескорпусных) систем для извлечения тяжелых металлов из осадков, отстойников систем очистки и открытых водоемов.

Второй из указанных выше методов удаления вредных тяжелых металлов из воды связан с непосредственным воздействием на нее излучения высокой энергии. Этот метод очистки сточных вод был исследован совместными усилиями специалистов Института катализа и Новосибирского государственного университета на стенде ИЯФ, оборудованном ускорителем электронов ЭЛВ. При этом было установлено, что под действием электронного пучка происходит восстановление хрома Cr<sup>6+</sup> и других ионов ряда других тяжелых металлов с осаждением их из обрабатываемых модельных растворов. Меняя величину поглощенной дозы, можно снизить концентрацию в воде практически всех ионов металлов до ПДК (предельно допустимых концентраций) или осуществить их полное

осаждение, что является уникальным результатом. Кроме глубокой степени очистки, такой метод имеет еще одно важное преимущество перед химическими способами очистки: при воздействии электронного пучка получают высококонцентрированные осадки металлов, пригодные для последующего применения, в то время как при других способах очистки осадки подлежат захоронению или дополнительной обработке. Количественные показатели воздействия электронного пучка на растворы хромата калия (K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>) и бихромата калия (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) в присутствии тиосульфата натрия представлены в табл. 3.

Радиационный метод очистки сточных вод отличается низким уровнем энергозатрат по сравнению с традиционными методами. Находящиеся в настоящее время в эксплуатации радиационные установки имеют производительность от 1000 до несколько десятков тысяч м<sup>3</sup> в сутки. В большинстве случаев эти установки пока являются исследовательскими и лишь немногие из них опытно-промышленными и совсем редко промышленными. В процессе их работы происходит накопление данных о возможностях радиационной обработки стоков, содержащих различные загрязнители, изучаются технические возможности ускорительной техники и осуществляется сравнительная экономическая оценка различных установок. Стоимость ускорителей в настоящее время относительно велика, в частности, из-за ограниченного их производства и сравнительно больших капитальных затрат, связанных с реализацией радиационных установок. Несмотря на эти ограничивающие факторы, исследования, выполненные в более стабильные времена развития нашей отечественной экономики, и исследования последних лет в США свидетельствуют о том, что радиационный метод очистки на базе ускорителей электронов может конкурировать с рядом других традиционных и новых методов обработки воды ряда промышленных стоков.

## ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ОТ ОКИСЛОВ СЕРЫ И АЗОТА

Н.З.ЛЯХОВ, Р.А.САЛИМОВ, Г.А.СПИРИДОНОВ

*Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН  
Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН*

Тепловые электростанции относятся к числу наиболее серьезных источников загрязнения воздушной среды. При сжигании в котлах этих станций органического топлива образуются, помимо углекислого газа, окислы серы и азота, которые с отходящими газами поступают в атмосферу, где под действием ультрафиолета и в присутствии водяных паров образуют соединения, выпадающие на землю в виде кислотных дождей. Эти дожди губительно действуют на почвенный и растительный покров. Вследствие миграции воздушных потоков, содержащих такие загрязнения, проблема очистки выбросов имеет трансконтинентальный характер и может быть решена только объединенными усилиями наиболее развитых в технологическом отношении стран.

В связи с требованиями международной ответственности по защите окружающей среды с каждым годом ужесточаются национальные нормы и правила в отношении лимитов выброса газов. Это побуждает промышленные и электрические компании ряда стран (Япония, ФРГ, США, Италия, Польша, а в последние годы и КНР) вкладывать значительные средства в модернизацию существующих, сооружение и разработку новых очистных систем, обеспечивающих требуемую эффективность газоочистки. В конечном счете создан колоссальный рынок новых технологий, снижающих выбросы в атмосферу токсичных компонентов. При этом признается, что общепринятый в мировой практике способ газоочистки (поглощение токсичных газовых компонентов  $\text{CaCO}_3$  или  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  с образованием сульфитов и нитритов кальция) отличается

громоздкостью и малоэффективностью по отношению к субоксидам азота. Твердые продукты не могут быть утилизированы, к тому же они не стойки при хранении.

Одним из перспективных методов очистки отходящих газов тепловых электростанций от окислов серы и азота является радиационный, использующий ускорители электронов. К настоящему времени этот способ реализован в разных странах лишь на пилотных (демонстрационных) установках (производительность по отходящему газу от 1000 до 20 000 м<sup>3</sup>/ч). Степень очистки от  $\text{SO}_2$  составляет 95% и от  $\text{NO}_x$  – 70–80%. Важно отметить, что при этом способе диоксид серы и субокислы азота удаляются одновременно. Метод не критичен к остаточному содержанию золы в отходящих газах, хотя степень очистки от золы, естественно, определяет чистоту конечных продуктов, которые могут быть использованы в качестве удобрения. Метод прост и удобен в эксплуатации и более адекватен всему процессу производства электроэнергии, как и электрофильтры, которые уже широко используются в системах очистки отходящих газов электростанций для удаления золы.

В основе электронно-лучевого (радиационного) метода (получившего название Эбара-процесс по названию японской фирмы «Эбара») лежит доокисление  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_x$  до высших оксидов с одновременным связыванием их в виде кислот или солей. Электронный пучок генерирует в отходящих газах высокие концентрации ионрадикалов, которые, имея высокую реакционную способность, доокисляют низшие окислы в кислоты (в присутствии паров воды в отходящих



газах). Образующиеся кислоты нейтрализуют с помощью аммиака, получая в итоге смесь нитрата и сульфата аммония. Конечные продукты в виде сухих гранул имеют коммерческую ценность, так как могут быть использованы в качестве удобрения или почвенного кондиционера. Общая схема Эбара-процесса приведена на рис. 1.

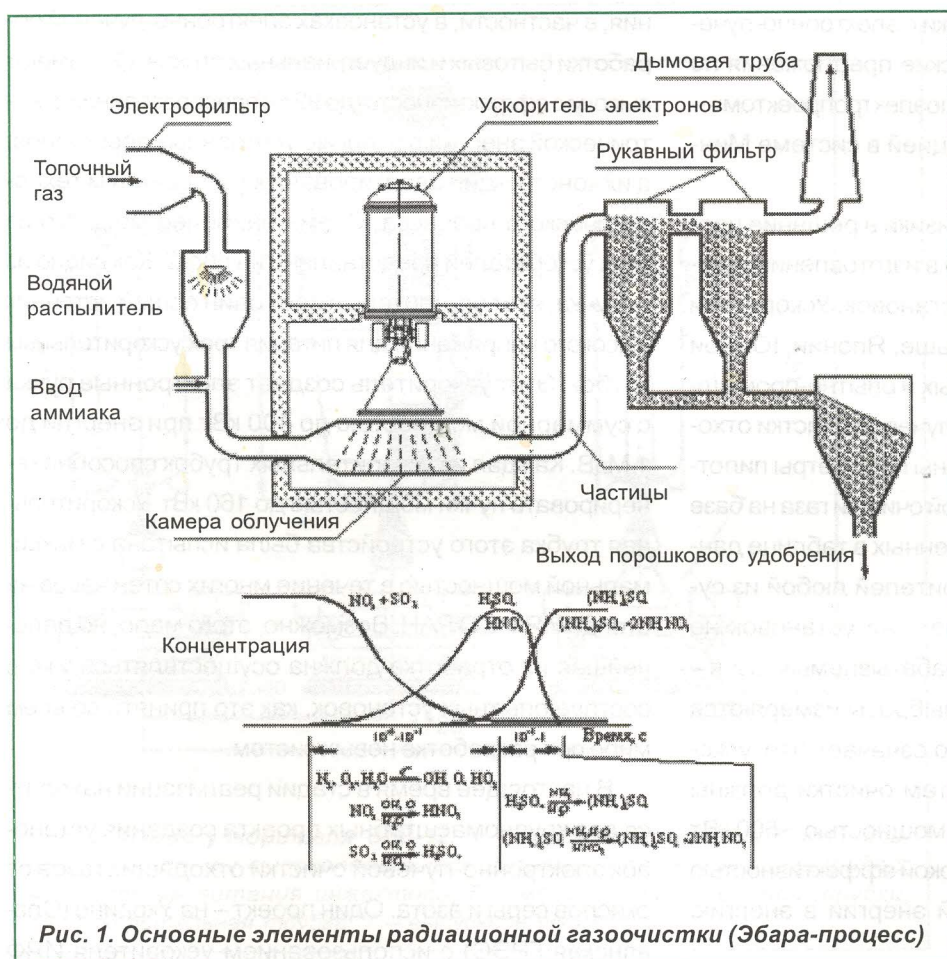
Эбара-процесс не настолько прост, как может показаться на первый взгляд. Одной из основных проблем является требование постоянного мониторинга концентрации оксидов серы и азота в отходящих газах, которая определяет уровень подпитки аммиака. Уголь и газ редко имеют стабильный состав, вследствие чего концентрация, по крайней мере, оксида серы колеблется во времени. При переизбытке аммиака он может проскочить в окружающую среду, что также небезопасно. При значительном дефиците аммиака не будет достигаться требуемый уровень ПДК

по окислам азота и серы. Кроме того, предлагаемый метод подразумевает постоянную доставку больших количеств жидкого аммиака на тепловые и электрические станции, создание резервных запасов, их обслуживание и т.д. Тем не менее большая часть из перечисленных проблем может быть решена доступными уже сегодня техническими средствами.

В результате исследований достаточно четко определены оптимальные параметры процесса газовой очистки: температура – около 70–90 °С, влажность 8–10% об., добавка аммиака – в стехиометрическом количестве от количества содержащихся в отходящих газах диоксида серы и субоксида азота. Доза облучения составляет примерно 10 кГр, что соответствует энергозатратам на очистку от окислов порядка 4 МВт·ч на 1 млн м<sup>3</sup>. Установочная суммарная мощность ускорителей в оптимистичном варианте составляет примерно 6 МВт для электростанции мощностью 500 МВт (э)

(объем отходящих газов около 1,5 млн м<sup>3</sup>/ч) или более 1% от номинальной мощности, вырабатываемой ею электроэнергией. С учетом затрат энергии на различные вспомогательные газовые и ускорительные системы коэффициент потребления энергии на обеспечение работы всей системы очистки, по-видимому, возрастет в 2–3 раза.

Следует отметить, что ряд зарубежных организаций изучает возможность использования электронно-лучевой очистки отходящих газов от окислов серы, азота и других вредных соединений в установках очистки мусоросжигательных заводов, металлургических заводов и в системах очистки воздуха в длинных автотуннелях. Отечественные разработчики предполагали



### Применение ускорителей ИЯФ типа ЭЛВ в процессах газоочистки

Место установки	Энергия, МэВ	Мощность, кВт	Год поставки ускорителя	Производительность, м <sup>3</sup> /ч
Польша (г. Варшава)	0,5–0,7	2 × 50	1989	20 000
Япония (г. Мацудо)	0,3–0,95	15	1990	1000
Япония (г. Кобе)	0,5	15	1994	1000
Корея (г. Теджон)	0,8–1,2	40	1993	Нет данных
Россия (г. Новосибирск)	0,5–0,7	50	1990	20 000 (демонт.)
Украина (г. Славянск)	0,7–0,8	150	1998	100 000 (проект)

использовать электронно-лучевую обработку в системах очистки от окислов серы природного горючего газа. К сожалению, этот последний проект не был реализован из-за усложнения экономического положения России. По указанной причине в начале 1990-х годов были приостановлены также работы по созданию в нашей стране опытной установки с электронно-лучевой системой очистки, технические предложения по которой были разработаны «Теплоэлектропроектом» – головной (в то время) организацией в системе Минэнерго СССР.

Вклад Института ядерной физики в решение проблемы газоочистки заключается в изготовлении ускорителей электронов для этих установок. Ускорители серии ЭЛВ применяются в Польше, Японии, Южной Корее, России, Украине в опытных и опытно-промышленных установках электронно-лучевой очистки отходящих газов. В таблице приведены параметры пилотных установок электронно-лучевой очистки газа на базе ускорителей ЭЛВ. Из представленных в таблице данных видно, что мощность ускорителей любой из существующих к настоящему времени установок не превышает 100 кВт, а объем обрабатываемых газов – 20 000 м<sup>3</sup>/ч. Однако реальные выбросы измеряются сотнями тысяч м<sup>3</sup>/ч и более. Это означает, что ускорительные комплексы для систем очистки должны состоять из модулей единичной мощностью ~500 кВт и более, обладающих очень высокой эффективностью преобразования электрической энергии в энергию электронного пучка.

В ИЯФ СО РАН разработано новое поколение высоковольтных ускорителей (мощность выведенного пучка – сотни киловатт), предназначенных для установок электронно-лучевой очистки отходящих газов тепловых станций. Они могут быть использованы и в других установках, требующих повышенной мощности излучения, в частности, в установках электронно-лучевой обработки бытовых и промышленных стоков. Они имеют высокую эффективность (до 92%) преобразования электрической энергии в энергию ускоренных электронов, а их конструкция адаптирована к требованиям технологического процесса. Схема наиболее мощного из этих ускорителей представлена на рис. 2. Как видно из рисунка, этот ускоритель имеет один общий источник высокого напряжения для питания трех ускорительных трубок. Этот ускоритель создает электронные пучки с суммарной мощностью до 400 кВт при энергии до 1 МэВ. Каждая из ускорительных трубок способна генерировать пучки мощностью до 160 кВт. Ускорительная трубка этого устройства была испытана с максимальной мощностью в течение многих сотен часов на стенде ИЯФ СО РАН. Возможно, этого мало, но дальнейшая их отработка должна осуществляться уже в составе опытных установок, как это принято во всем мире при разработке новых систем.

В настоящее время в стадии реализации находятся два крупномасштабных проекта создания установок электронно-лучевой очистки отходящих газов от окислов серы и азота. Один проект – на Украине (Славянская ГРЭС) с использованием ускорителя ИЯФ

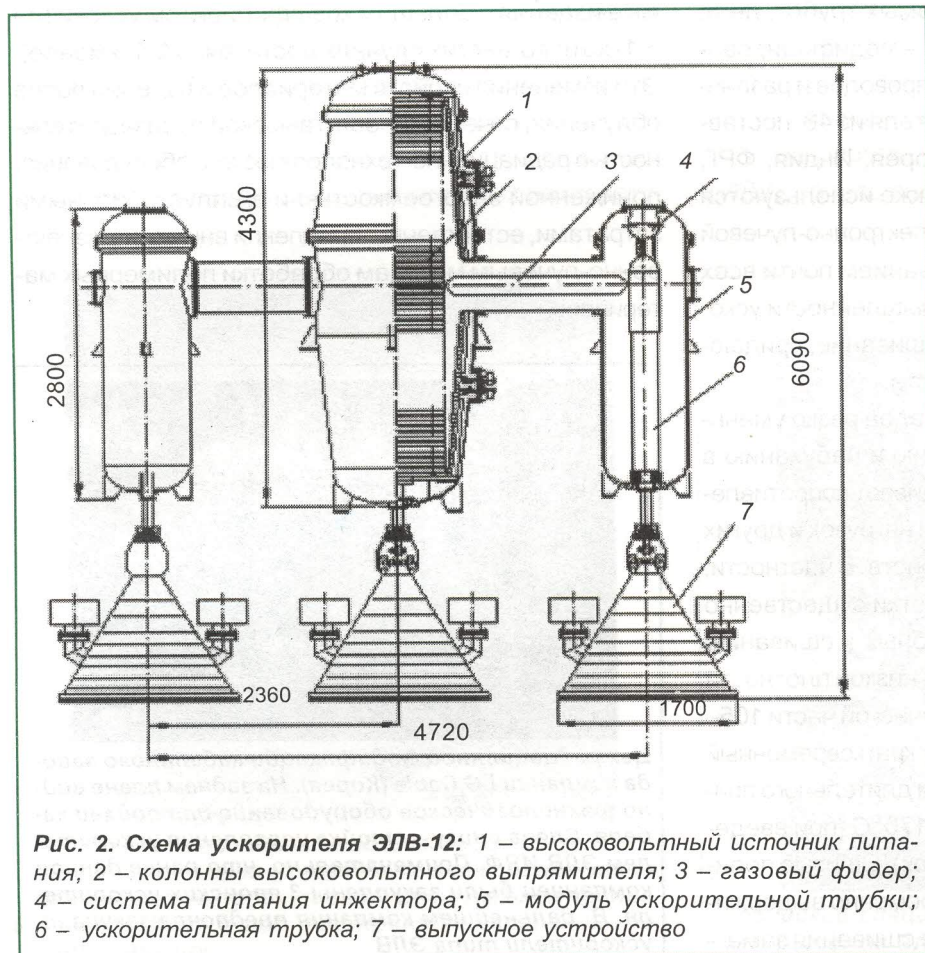
типа ЭЛВ-6 мощностью до 160 кВт. Проектная производительность этой опытной установки электронно-лучевой очистки – 100 тыс. м<sup>3</sup>/ч. Весь комплекс проектных работ осуществляет НПО «ЭЛЕКТРОСТАЛЬ». Другой проект – в Польше на базе Поморжанской ГРЭС. На этой установке предполагается обрабатывать до 300 тыс. м<sup>3</sup>/ч отходящих газов. В этой установке используются четыре ускорителя японского производства, каждый мощностью 300 кВт. На первой из указанных установок предполагается апробировать в реальных условиях ряд идей по увеличению эффективности электронно-лучевой очистки отходящих газов, выдвинутых российскими и украинскими научными организациями.

В заключение необходимо отметить, что международное сообщество (МАГАТЕ) и ряд крупнейших фирм в ряде стран (Япония, ФРГ, США, КНР, Италия) субсидируют проведение работ как по определению воз-

можностей электронно-лучевого метода очистки отходящих газов от окислов серы и азота, так и по созданию опытных и опытно-промышленных установок на основе этого метода, предполагая извлечь соответствующие дивиденды. Нужны отечественные вложения в это направление работ. Еще недавно объем токсичных выбросов на предприятиях Минэнерго СССР составлял ~ 10 млн т/год, очистке подвергалось не более 2% выбросов. С того времени положение, можно полагать, не улучшилось, если не стало еще хуже. Требования к очистке отходящих газов таких определяющих состояние мировой окружающей среды загрязняющих ее источников, как электростанции, все время повышаются, и может сложиться такая же ситуация в деле очистки отходящих газов от окислов серы и азота, какая сложилась и/или складывается в вопросах обеспечения снижения шума самолетов. Неприятие в свое время требований мировой общественности и не учет требований правительственных регламентов ряда стран породили осложнения для полетов отечественных самолетов в эти страны, со всеми вытекающими экономическими последствиями.

Следует иметь в виду, что для решения этой задачи наша страна пока еще располагает проектными и исследовательскими кадрами и имеет хорошую основу для реализации существующих и разработки новых ускорительных систем в Институте ядерной физики и других организациях России. Завтра же из-за отсутствия опыта использования этого оборудования мы можем оказаться в опасном состоянии, когда международные природоохранительные организации смогут поставить под сомнение наши достижения в области производства энергии.

Следует иметь в виду, что для решения этой задачи наша страна пока еще располагает проектными и исследовательскими кадрами и имеет хорошую основу для реализации существующих и разработки новых ускорительных систем в Институте ядерной физики и других организациях России. Завтра же из-за отсутствия опыта использования этого оборудования мы можем оказаться в опасном состоянии, когда международные природоохранительные организации смогут поставить под сомнение наши достижения в области производства энергии.



**Рис. 2. Схема ускорителя ЭЛВ-12:** 1 – высоковольтный источник питания; 2 – колонны высоковольтного выпрямителя; 3 – газовый фидер; 4 – система питания инжектора; 5 – модуль ускорительной трубки; 6 – ускорительная трубка; 7 – выпускное устройство

## УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ ТИПА ЭЛВ И ИЛУ В ПРОЦЕССАХ ПРОИЗВОДСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРОВ

В.А.БОРИСОВ, А.Г.СИРОТА, Э.Э.ФИНКЕЛЬ, Г.А.СПИРИДОНОВ, С.Н.ФАДЕЕВ

ООО «НТЦ Радтехнология»

ОАО «Пластполимер»

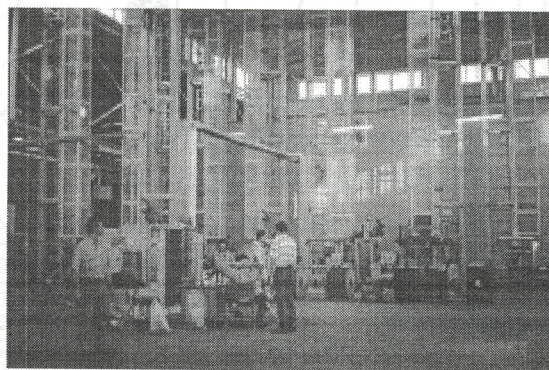
ОАО «ВНИИ кабельной промышленности»

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН

Свыше 25 лет Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН осуществляет разработку, изготовление и поставку предприятиям страны и зарубежным фирмам ускорителей электронов – мощных источников ионизирующего излучения широкого профиля использования. Из 120 установок, изготовленных ИЯФ, 64 ускорителя используются для облучения полимеров, из них на 22 установках осуществляется облучение полимерных труб, термоусаживаемых трубок, лент, шлангов, манжет и пленок и на 42 – модифицирование полимерной электроизоляции проводов и различных кабельных изделий; 33 ускорителя из 48, поставленных за рубеж (КНР, Южная Корея, Индия, ФРГ, Польша, Венгрия, Чехия и др.), также используются для обработки полимеров. Целью электронно-лучевой обработки полимеров с использованием почти всех поставленных предприятиям промышленности ускорителей является радиационное сшивание, придающее материалам ряд ценных свойств.

Сшивание полимерных материалов резко уменьшает их способность к растворению и набуханию в растворителях, значительно увеличивает сопротивление растрескиванию под влиянием нагрузок и других факторов, улучшает ряд других свойств. В частности, в результате радиационной обработки существенно возрастает теплостойкость способных к сшиванию полимеров. Например, полиэтилен низкой плотности с интервалом плавления кристаллической части 105–115°C после сшивания выдерживает кратковременный нагрев до 250–300°C и пригоден для длительного применения при температуре до 150–170°C (при введении в него соответствующих добавок). Сшитые полиамиды и полиэферы могут кратковременно выдерживать нагрев до 450°C. В результате сшивания замет-

но снижается ползучесть термопластичных материалов под воздействием механических нагрузок, проявляющаяся даже при сравнительно низких температурах, улучшаются износоустойчивость, твердость и другие механические характеристики и, что особенно важно для многих применений, сшитый материал приобретает свойство памяти формы, позволяющее производить из полимерных материалов термоусаживаемые изделия с большим коэффициентом усадки (до 6:1, хотя во многих случаях достаточно 2:1 и менее). Эти изменения свойств материалов и изделий после облучения, сочетающиеся с высокой производительностью радиационно-технологического оборудования, пониженной энергоемкостью и эксплуатационными затратами, естественно, привлекли внимание к электронно-лучевым методам обработки полимерных материалов.



*Цех радиационной модификации кабельного завода компании LG Cable (Корея). На заднем плане видно технологическое оборудование для подачи кабеля. Слева внизу – стойка управления ускорителем ЭЛВ ИЯФ. Примечательно, что ранее данной компанией были закуплены 3 японских ускорителя. В дальнейшем компания предпочла закупать ускорители типа ЭЛВ*

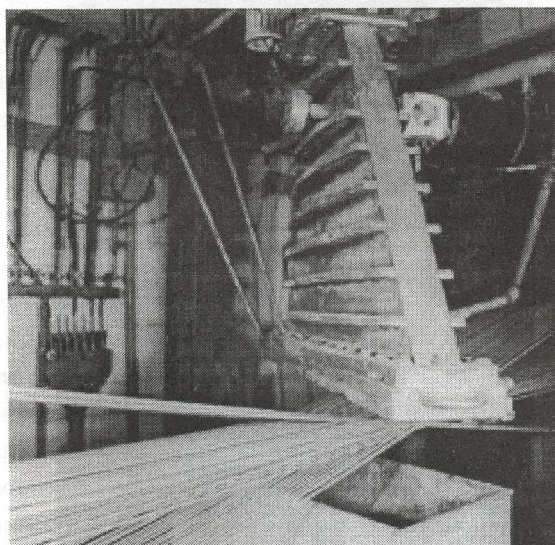
Еще в начале 1960-х годов в кабельной промышленности возникла настоятельная необходимость в изделиях повышенной надежности и термостойкости. Был развернут комплекс работ по изучению возможности использования для этого ионизирующих излучений. Эти потребности диктовались в то время стремительным развитием атомной энергетики, космического аппаратостроения и вычислительной техники.

Комплекс работ, выполненных во ВНИИ кабельной промышленности совместно с НИФХИ им. Л.Я.Карпова и рядом других организаций страны, показал, что обработка ионизирующим излучением обычной (выпускаемой промышленностью) полимерной электроизоляции кабельных изделий ионизирующим излучением позволяет заметно продвинуться в реализации повышенных требований лишь до температур 100–105 °С. Вместе с тем этот комплекс работ продемонстрировал и необходимость осуществления значительного объема дополнительных исследований по уменьшению технологической дозы излучения, изысканию и вводу в исходные полимерные композиции различного рода добавок, особенно длительно стабилизирующих облученные материалы, эксплуатирующихся при более высоких температурах. Важно было не только добиться улучшения свойств электроизоляционных материалов при повышенных температу-

рах, но и обеспечить их сохранение в течение продолжительного времени. Наряду с исследованиями материаловедческого характера, в тот период пришлось решать и многие другие проблемы, связанные с реализацией электронно-лучевой технологии производства кабельных изделий и проводов с радиационно-модифицированной полимерной электроизоляцией.

Новая технология потребовала создания комплекса оборудования и выработки приемов его использования и эксплуатации. В первую очередь требовалось разработать ускорители электронов, работоспособные в условиях промышленного производства, хотя дело было не только в них. Как отмечают некоторые из участников этой эпопеи в статье «Достижения и перспективы развития электронно-лучевых технологий в электроизоляционной и кабельной технике» (Вестник «Радтех-Евразия»: ИЯФ СО РАН. Новосибирск. 1999. № 1(9), С. 53), техническая и экономическая целесообразность промышленной реализации электронно-лучевой технологии в электротехнической промышленности были predeterminedены решением ряда ключевых проблем, определяющий вклад в который внесли ряд организаций нашей страны. К числу таких ключевых проблем следует отнести такие, как:

- ▶ разработка ускорителей электронов (типа ЭЛВ и ИЛУ), обладающих приемлемыми физико-техниче-



*Облучение полиэтиленовой электроизоляции проводов с помощью ускорителя электронов типа ЭЛВ. Видно устройство для выпуска электронов в атмосферу и под ним провода, направленные «восьмеркой»*



*Корейские специалисты за пультом управления ускорителем ЭЛВ (Корея)*

скими характеристиками и достаточной надежностью, наряду с простотой эксплуатации в условиях промышленного производства продукции (ИЯФ им. Г.И.Будкера СО РАН);

- развитие принципов термостабилизации радиационно-сшитых полимеров и на их основе разработка рецептуры электроизоляционных, электропроводящих и шланговых композиций, обладающих работоспособностью при температуре выше 105 °С (ОАО «ВНИИКП» совместно с ГНЦ РФ НИФХИ им. Л.Я.Карпова, ОАО «Пластполимер» и НИИХТ полимеров им В.А.Каргина);

- разработка различных модификаций подпучкового оборудования для облучения длинномерных изделий (ОАО «ВНИИКП» с участием ИЯФ);

- разработка системы очистки вентиляционных выбросов, обеспечивающая экологическую безопасность электронно-лучевой технологии (ОАО «ВНИИКП» с ДФ ВНИИОГАЗ).

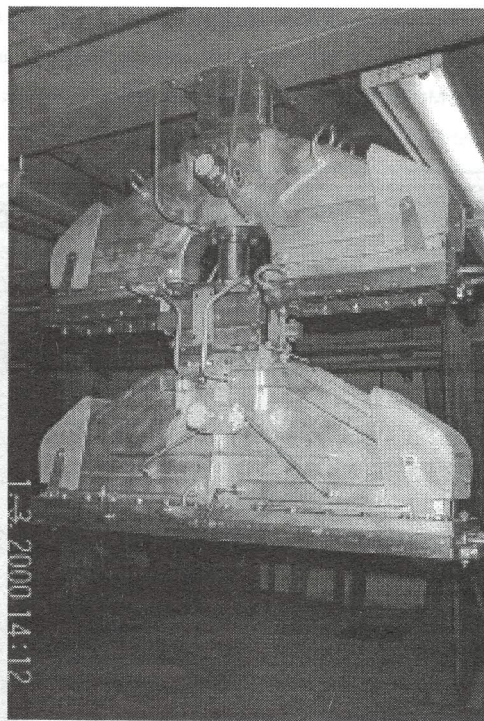
Участники этой комплексной работы по разработке и освоению электронно-лучевой технологии вспоминают, что именно в Институте ядерной физики создавалось необычное для промышленного использования оборудование – ускорители электронов, которые до этого применялись лишь в лабораторных условиях и обслуживались очень квалифицированным персоналом. Здесь создавались стенды, на которых отрабатывались как ускорители электронов, так и элементы подпучкового оборудования и приемы облучения. Здесь же на стендах осуществлялась подготовка обслуживающего персонала будущего опытного и промышленного производства. В этой работе принимали участие сотрудники как ИЯФ, так и ОАО «ВНИИКП», на длительное время приезжавшие из Москвы. Можно сказать, что для них стенды ИЯФ стали школой мастерства и первым полигоном, на котором отрабатывалась новая технология. Впоследствии, когда с использованием ускорителей ИЯФ на опытном заводе в г. Подольске были созданы первые опытно-промышленные установки для электронно-лучевой обработки кабельных изделий, это производство с его подготовленным персоналом в свою очередь стало основой для отработки всех элементов технологического оборудования перед его распространением на других заводах страны.

Следует отметить, что созданные опытно-промышленные установки ОАО «ВНИИКП» оказались тем «ис-

пытательным полигоном», на котором и ИЯФ СО АН СССР смог получать бесценную достоверную информацию об эксплуатации разработанных им ускорителей в условиях промышленного производства. Именно наличие и постоянное расширение объема этой информации, накапливавшейся и обобщавшейся персоналом ОАО «ВНИИКП», позволило ИЯФ СО АН СССР провести большой комплекс работ по созданию ускорителей электронов нового поколения, отличавшихся повышенной надежностью. Эти работы завершились созданием образцов первых ускорителей новой серии, известных в настоящее время как ускорители типа ЭЛВ.

Это позволило, по-видимому, впервые в практике академического института предъявить выполненную разработку для приемки Межведомственной комиссии, разработать и утвердить в 1974 г. в установленном порядке Технические условия на ускорители электронов.

Начиная с 1968 г. на опытно-промышленных установках ОАО «ВНИИКП» было освоено промышленное производство разработанной к тому времени весьма широкой номенклатуры кабельных изделий повышен-



*Ускорители ИЛУ. Устройство для выпуска электронов в атмосферу для 4-стороннего облучения труб, термоусаживаемых трубок и проводов при высоких требованиях к равномерности облучения*

РЕФЕРАТЫ СТАТЕЙ

ной надежности и нагревостойкости. Она включала производство облегченных судовых кабелей, бортовых авиационных проводов нового поколения, гамму монтажных проводов для радиоэлектронной, электротехнической аппаратуры и вычислительной техники, а также малогабаритных кабелей управления, специальных проводов и кабелей для ракетно-космической техники, кабелей для систем управления и защиты ядерных реакторов АЭС и других ядерно-радиационных объектов и т.д. Одновременно было освоено производство электроизоляционных нагревостойких трубок, в том числе термоусаживаемых, для бандажирования жгутов проводов, изолирования мест соединений проводов и для кабельной арматуры. Все эти изделия изготавливали с применением разработанных полимерных материалов на основе композиций, специально предназначенных для радиационного сшивания.

С использованием широкого ассортимента разработанных полимерных композиций, оборудования и технологических принципов на шести заводах электротехнической промышленности бывшего СССР к 1985 г. функционировало 16 технологических линий, оснащенных ускорителями ИЯФ ЭЛВ-1, ЭЛВ-2, ЭЛВ-4 и ИЛУ-8. На основе электронно-лучевой технологии было организовано производство нагревостойких проводов и кабелей различного назначения, а также электроизоляционных термоусаживаемых установочных изделий. Создание столь большого производства и продолжительный опыт его работы с использованием оборудования ИЯФ послужили своеобразной рекламой для ускорителей, которые с начала 1980-х годов стали не только поставляться на мировой рынок, но и составлять его заметную долю, особенно в последние годы.

Разработки последних лет позволили создать для промышленных радиационно-технологических процессов ускорители с энергией электронов до 5 МэВ и мощностью пучка до 50 кВт. Эти разработки в сочетании с более прогрессивными пожаробезопасными электроизоляционными композициями открывают дополнительные перспективы дальнейшего применения электронно-лучевой технологии в кабельной промышленности.

В нашей стране было начато освоение электронно-лучевой технологии обработки полимерных изделий и материалов в химической и атомной отраслях промышленности, в которые во времена СССР вхо-

дили многие ведущие научно-исследовательские организации, занимавшиеся производством и переработкой полимеров: НПО «Пластик», ОАО «Пластполимер», его Новополюцкое отделение и др. Новое время породило и новые потребности. Возник запрос (и не только в кабельной промышленности) на термостойкие полимерные трубы, различные полимерные термоусаживаемые материалы и изделия, в том числе с липким подслоем для защиты от коррозии магистральных и промысловых газо- и нефтепроводов и различных муниципальных трубопроводов. И тогда, когда промышленность не успевала развернуть специализированные производства, ИЯФ, который продолжал свои работы по совершенствованию и созданию новых ускорителей, не раз приходилось подключаться к выпуску остродефицитной полимерной продукции на основе электронно-лучевой технологии. Конечно, при этом снимался лишь пик в удовлетворении запросов отраслей промышленности. Однако, решая конкретную задачу по выпуску полимерных изделий повышенного качества, что не свойственно для академического института, ИЯФ приобретал ценный опыт в создании подпучкового оборудования и разработке новых технологий, который очень пригодился в будущем.

Приведем лишь два примера. Во второй половине 1970-х годов срочно потребовалось (в связи с организацией в стране производства широкофюзеляжных самолетов) большое количество термоусаживаемых трубок для фиксации жгутов на бортовых трассах самолетов. Предприятия химической промышленности в то время уже вели подготовку своих производств к выпуску этих изделий, но они еще не были готовы для решения новых задач в полном объеме. И тогда поступило обращение в ИЯФ произвести облучение полимерных трубок на стендах института. Для этого был использован стенд с ускорителем типа ИЛУ. Облучение трубок осуществлялось круглосуточно и без выходных. Заготовки трубок и обработанные под ускорителем трубки доставлялись самолетами на аэродром авиационного завода им. В.Чкалова в г. Новосибирске и с него же самолетами отправлялись в центр для осуществления операции раздува трубок, завершающей их изготовление. Станным для непосвященного человека представлялся в то время переход между экспериментальными промежутками установки со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-4

(в ответвлении за защитой размещался ускоритель ИЛУ-6). В один из экспериментальных промежутков в проходе вываливались горы извивающихся трубок (исходных и обработанных). Впоследствии этот опыт получения большого количества термоусаживаемых трубок был использован на ряде предприятий страны и позволил институту также рекламировать свое оборудование на мировом рынке.

Другой пример. В 1980-х годах в связи со строительством протяженных газо- и нефтепроводов для перекачки нефтепродуктов в центр нашей страны и за рубеж все более остро стала ощущаться потребность в специальных материалах для защиты их от коррозии. При этом много надежд возлагалось на трубопроводы с заводской изоляцией. Однако соединение на трассе отрезков труб с такой изоляцией в нитку требовало специальных мер по защите сварного соединения от коррозии. Для этого предполагалось использовать специально созданные полимерные манжеты с клеящим (липким) подслоем. Мировая практика и отечественный опыт свидетельствовали о том, что защита от коррозии сварных соединений труб с помощью заводской антикоррозионной изоляции является разумной, и надо лишь организовать в стране производство манжет из специальных полимерных композиций, обеспечивающих их многолетнюю эксплуатацию в суровых условиях трасс. Для проведения всесторонних испытаний нужно было несколько тысяч манжет, а это требовало облучения исходной полимерной ленты в объеме до 15–20 т, которое было организовано в ИЯФ. Обработка такого количества ленты без вспомогательных устройств и транспортных систем,

обычно применяемых в промышленном производстве, создала довольно большие сложности для персонала ускорителя ЭЛВ, на стенде которого производилось облучение. Тем не менее данная работа была выполнена, и в организациях атомной промышленности, от которых поступил этот заказ, проведены завершающие этапы работ по созданию отечественной манжеты для защиты сварных соединений магистральных газопроводов диаметром до 1420 мм. Последовавшие за этим испытания на экспериментальном полигоне Миннефтегазстроя в пос. Белоярский продемонстрировали высокие качества созданных манжет.

Мы привели здесь в качестве примеров использования ускорителей ЭЛВ и ИЛУ лишь работы, выполнявшиеся в основной их части непосредственно на стендах ИЯФ. Однако следует подчеркнуть, что огромная работа по использованию этих ускорителей выполнялась и непосредственно в организациях промышленности: ОАО «ВНИИКП» с сетью кабельных заводов, ОАО «Пластик» и его Загорском заводе пластмасс, ОАО «Пластполимер» и его Новополюцком отделении, ООО «НТЦ Радтехнология» и Соликамском лесокомбинате. На основе этого опыта органы планирования СССР намеревались в свое время создать в стране более 40 технологических линий по переработке пластмасс на базе отечественных ускорителей и электронно-лучевой технологии. К сожалению, из этого весьма обширного плана было реализовано только ограниченное число производств.

Невостребованность электронно-лучевых технологий, ускорителей электронов и установок на их основе особенно в последнее десятилетие была восполнена их поставками в ряд зарубежных стран, где они в основном используются для обработки полимерной продукции, свойства которой после электронно-лучевой обработки намного превышают исходные.

Мы надеемся, что изложенный в статье опыт использования ускорителей электронов для обработки полимеров, расширяющиеся представления о возможностях радиационно-химического модифицирования полимеров, а также неизбежное увеличение потребностей техники в полимерных изделиях высокого качества могут послужить импульсами для создания в нашей стране новых технологических линий на основе отечественных ускорителей и разработок электронно-лучевых технологий.



*Посещение председателем Госсовета КНР Цзян Цзи Минем производства термоусаживаемых изделий на базе ускорителя ЭЛВ (г. Чан-Чунь, Китай)*



## РЕФЕРАТЫ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В НОМЕРЕ

**Ускорители электронов и электронно-лучевые (радиационные) технологии.** *Салимов Р.А., Спиридонов Г.А., Фадеев С.Н.* Описывается роль и значение электронно-лучевых технологий в осуществлении промышленного производства различных видов продукции и показывается эффективность их реализации с использованием ускорителей электронов. Сообщается о прогрессе в развитии этих источников ионизирующего излучения, среди которых ускорители ИЯФ СО РАН в мировых поставках занимают достойное место. Институтом только ускорителей ЭЛВ и ИЛУ поставлено на внутренний и зарубежные рынки более 120 комплектов, из них на внешний рынок – 48 комплектов. Сообщается, что в последние годы особенно активно ускорители ИЯФ приобретаются предприятиями и фирмами КНР, Южной Кореи, Японии и ряда других стран (С. 1–4, ил. 4).

**Ускорители серии ЭЛВ и их применение в радиационно-технологических процессах.** *Вейс М.Э., Голубенко Ю.И., Куксанов Н.К., Немытов П.И., Прудников В.В., Салимов Р.А., Фадеев С.Н., Черепков В.Г.* В статье представлены конструкция, основные параметры и области применения наиболее массового типа отечественных ускорителей серии ЭЛВ. Рассмотрены различные конструкции производимых институтом систем многостороннего облучения, позволяющие без увеличения параметров ускорителя значительно улучшить равномерность облучения, а также поднять производительность технологического оборудования (С. 5–10, ил. 6).

**Импульсные высокочастотные линейные ускорители электронов серии ИЛУ.** *Ауслендер В.Л., Брызгин А.А., Воронин Л.А., Глаголев Г.Б., Горнаков И.В., Кокин Е.Н., Крайнов Г.С., Кузнецов Г.И., Лукин А.Н., Макаров И.Г., Максимов С.А., Мигинский С.В., Нехаев В.Е., Панфилов А.Д., Радченко В.М., Ромашко Н.Д., Сидоров А.В., Тиунов М.А., Ткаченко В.О., Тувик А.А., Факторович Б.Л., Ческидов В.Г.* Приводится краткое описание особенностей конструкции высокочастотных импульсных линейных ускорителей серии ИЛУ. Эти ускорители генерируют электронный пучок с энергией электронов в диапазоне 0,4–5,0 МэВ мощностью от 20 до 50 кВт. Кратко излагаются особенности широкого комплекса выпускных устройств, используемых с ускорителями данной серии. Приводятся примеры использования ускорителей ИЛУ в ряде технологических процессов (С. 11–17).

**Некоторые прикладные аспекты использования выведенного в атмосферу интенсивного сфокусированного электронного пучка.** *Голковский М.Г., Корчагин А.И., Куксанов Н.К., Лаврухин А.В., Салимов Р.А., Фадеев С.Н.* Описывается устройство выпуска в атмосферу пучка электронов через отверстие малого диаметра (~1 мм), обеспечивающее плотность потока электронов на выходе около 10 А/см<sup>2</sup> и плотность потока энергии 10 МВт/см<sup>2</sup>. Сообщается, что с использованием данного устройства возможно осуществление операций по закалке сталей и наплавке на различные материалы износостойких и тугоплавких покрытий. Демонстрируется возможность производства ультрадисперсных частиц оксида алюминия из расплава под действием интенсивного электронного пучка размером от 12 до 40 нм (С. 18–22, ил. 7).

**Использование электронного пучка в термохимических процессах.** *Ауслендер В.Л., Воронин А.П., Корчагин А.И., Бочкарев И.Г., Салимов Р.А., Суржиков А.П., Питулов А.М.* Применение интенсивных пучков электронов вне вакуума в процессах твердофазного и жидкофазного синтеза, спекания и легирования материалов увеличивает степень химических превращений по сравнению с чисто термическими условиями. Совокупность этих процессов называют радиационными термохимическими. В работе приведены результаты исследований и теоретические обоснования активации высокотемпературных реакций для широкого круга неорганических систем, высокотемпературные взаимодействия в которых (фазаобразование, спекание) являются определяющими в технологических процессах неорганического синтеза (С. 23–27, ил. 2).

**Использование ускорителей электронов в технологии производства полимерных композиционных материалов.** *Колесников А.А., Пискунова Е.Е., Салимов Р.А., Спиридонов Г.А.* Описываются особенности электронно-химической технологии производства полимерных композиционных материалов с использованием ускорителей ИЯФ серии ЭЛВ. Показано влияние специальных добавок в используемые композиции для снижения требуемых для их полимеризации доз облучения смесей полимеров. Кратко описывается электронно-химическая технология производства композитных материалов и состав оборудования для ее реализации. Сообщается, что на базе этой технологии на четырех заводах России производится до 120 тыс. кв. м различных материалов (С. 28–33, ил. 3).

**Электронно-лучевые технологии в фармакологии. Противотуберкулезные препараты.** *Верецагин Е.И., Гуляева Е.П., Богданова Л.А., Быстрова Т.Н., Махнева Т.В., Троицкий А.В., Шкурупий В.А., Ауслендер В.Л., Коробейников М.В.* Разработка нового противотуберкулезного препарата, обладающего способностью селективно доставляться в инфицированные *Micobacterium tuberculosis* фагоциты завершилась

созданием препарата «Изодекс», представляющего собой гизразид изоникотиновой кислоты (он же изониазид – наиболее эффективный и широко применяемый туберулоостатик), иммобилизованный на радиационно-активированном декстране. Проведенные исследования *in vitro* и *in vivo* показали, что препарат обладает не только высокой антимикобактериальной активностью, но и значительно менее токсичен, чем исходно взятый свободный изониазид (С. 34–39, ил. 6).

**Электронно-лучевые технологии в фармакологии. Гидрофильные гели полиэтиленоксида и иммобилизованные ферменты.** *Троицкий А.В., Гуляева Е.П., Богданова Л.А., Быстрова Т.Н., Махнева Т.В., Артамонов А.В., Верецагин Е.И., Гришин О.В., Каунин В.Н., Ауслендер В.Л., Коробейников М.В.* В работе описан способ получения гидрофильного геля полиэтиленоксида. В основе способа использована способность ионизирующего излучения вызывать радиационную «сшивку» полимера в водном растворе. Образующийся гель полиэтиленоксида нетоксичен, содержит от 5 до 50% полимера и может быть использован при получении композиционных лекарственных форм, содержащих биологически активные вещества, в том числе протеолитические ферменты *Vac.subtilis*. Иммобилизованные в геле протеазы обладают высокой термостабильностью и применяются в качестве лекарственного средства в медицине (С. 40–43, ил. 3).

**Электронно-лучевая стерилизация медицинских изделий однократного применения с использованием ускорителей ИЛУ.** *Ауслендер В.Л., Брызгин А.А., Сербин В.И., Воронин Л.А.* Описаны работы по использованию для стерилизации медицинских изделий однократного применения ускорителя электронов типа ИЛУ с максимальной энергией электронов до 2,6 МэВ и дано краткое описание двух установок с этим ускорителем, специально созданных и приспособленных для этой цели (С. 44–46, ил. 3).

**Использование ускорителей для радиационной дезинсекции зерна.** *Салимов Р.А., Черепков В.Г.* В статье приведены история создания, результаты исследований, конструкция и опыт эксплуатации радиационного дезинсектора зерна (РДЗ) на основе ускорителя электронов типа ЭЛВ на одесском портовом элеваторе. РДЗ состоит из двух технологических линий с производительностью обработки ~200 т/ч каждая. Установка эксплуатируется с 1980 г. На ней успешно обработано свыше 7 млн тонн пшеницы. На основе ускорителя Института ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН разрабатываются РДЗ с производительностью дезинсекции зерна до 500 т/ч (С. 47–48, ил. 2).

**Использование ускорителей электронов в процессах очистки муниципальных и промышленных сточных вод.** *Ванюшкин Б.М., Куксанов Н.К., Иванченко В.А., Горбунов В.А., Спиридонов Г.А.* Сообщается о возможности использования ускорителей электронов в процессах очистки сточных вод от вредных веществ и патогенных микроорганизмов. Приведены качественные и количественные данные по использованию электронных пучков для обеззараживания муниципальных сточных вод и результаты многолетней работы первой и пока единственной в мире промышленной установки для радиационной очистки сточных вод завода синтетического каучука от биологически стойкого поверхностно-активного вещества (некаля) с максимальной концентрацией до 150 мг/л. Показывается возможность использования электронно-лучевых технологий для производства волокнистых ионитов-сорбентов тяжелых металлов из водных растворов и использования прямого облучения сточных вод электронами для удаления из них ионов вредных тяжелых металлов (С. 49–53, ил. 2).

**Электронно-лучевая технология очистки газовых выбросов тепловых электростанций от окислов серы и азота.** *Ляхов Н.З., Салимов Р.А., Спиридонов Г.А.* Кратко изложены основы процесса очистки отходящих газов от окислов серы и азота (Эбара-процесс) с использованием ускоренных электронов. Сообщается об использовании ускорителей ИЯФ типа ЭЛВ в экспериментальных установках по очистке отходящих газов в Японии, Польше, Украине. Приводится схема мощного ускорителя электронов ЭЛВ-12, разработанного и испытанного на стенде ИЯФ. Этот ускоритель способен генерировать (при энергии электронов до 1 МэВ) три электронных пучка общей мощностью до 400. При испытании на стенде ускоритель продемонстрировал высокую работоспособность, характерную для всех ускорителей типа ЭЛВ (С. 54–56, ил. 2).

**Ускорители электронов типа ЭЛВ и ИЛУ в процессах производства и переработки полимеров.** *Борисов В.А., Сирота Г.А., Финкель Э.Э., Спиридонов Г.А. и Фадеев С.Н.* Кратко описано становление отечественной промышленности по радиационной модификации полимерных изделий на основе ускорителей электронов серий ЭЛВ и ИЛУ, созданных в Институте ядерной физики СО РАН. Приведены примеры таких производств. Кратко описаны положительные изменения физических и химических свойств полимерных материалов, повышающие потребительские качества материалов на их основе. Приводятся примеры участия ИЯФ в переработке полимерных изделий и материалов на основе электронно-лучевой технологии (С. 57–60, ил. 5).

Журнал зарегистрирован  
Министерством Российской  
Федерации по делам печати,  
телерадиовещания и средств  
массовых коммуникаций 28.07.2000 г.  
Регистрационный номер ПИ №77-5087

**Учредитель** –  
Научно-техническое предприятие  
«Вираз-Центр» (ООО)

**Директор издания**  
Михаил Анварьевич Мензуллов

**Научный редактор выпуска**  
Александр Николаевич Скринский,  
академик  
Директор ИЯФ СО РАН

**Институт ядерной физики**  
им. Г.И.Будкера СО РАН

**Ведущий редактор**  
Зинаида Михайловна Прокопьева

**Адрес редакции:**  
Россия, Москва,  
ул. 7-я Парковая, д. 26, стр. 1, офис 205  
Тел.: (095) 965 08 47  
E-mail: virste@dol.ru  
http://www.virste.ru

**Почтовый адрес:**  
Россия, 111394, Москва, а/я 28

**Региональные представители:**  
Исаак Ионович Брагинский  
г. Черноголовка Московской области  
Виктор Семенович Лагунов  
г. Воронеж  
Дмитрий Иванович Гурьянов  
г. Тольятти

Оригинал-макет изготовлен  
ООО НТП «Вираз-Центр»

**Верстка:**  
Г.Х. Мензуллова

**Цветоделение и дизайн обложки:**  
Н.Д. Шмыткин

**Отпечатано:** ПБОЮЛ Степанов Б.Э.  
Москва, ул. Щербаковская, 53  
Заказ № 277  
Тираж 500 экз.

Индекс по каталогу «Роспечати»:  
72477 (на полугодие)  
Цена – договорная

*Мнение редакции не всегда совпадает с мнением  
авторов публикаций.*

*Авторы опубликованных материалов несут полную  
ответственность за достоверность приве-  
денных сведений, а также за наличие в них дан-  
ных, не подлежащих открытой публикации.*

*Перепечатка, все виды копирования и воспроизведе-  
ния материалов, публикуемых в журнале «На-  
ука-производству», осуществляются только с  
разрешения редакции.*

- Салимов Р.А., Спиридонов Г.А., Фадеев С.Н.**  
Ускорители электронов и электронно-лучевые  
(радиационные) технологии ..... 1
- Вейс М.Э., Голубенко Ю.И., Куксанов Н.К. и др.**  
Ускорители серии ЭЛВ и их применение  
в радиационно-технологических процессах ..... 5
- Ауслендер В.Л., Брызгин А.А., Воронин Л.А. и др.**  
Импульсные высокочастотные линейные ускорители  
электронов серии ИЛУ ..... 11
- Голковский М.Г., Корчагин А.И., Куксанов Н.К. и др.**  
Некоторые прикладные аспекты использования  
выведенного в атмосферу интенсивного  
сфокусированного электронного пучка ..... 18
- Ауслендер В.Л., Воронин А.П., Корчагин А.И. и др.**  
Использование электронного пучка в термохимических  
процессах ..... 23
- Колесников А.А., Пискунова Е.Е.,  
Салимов Р.А., Спиридонов Г.А.**  
Использование ускорителей электронов в технологии  
производства полимерных композиционных материалов ..... 28
- Верещагин Е.И., Гуляева Е.П., Богданова Л.А. и др.**  
Электронно-лучевые технологии в фармакологии.  
Противотуберкулезные препараты ..... 34
- Троицкий А.В., Гуляева Е.П., Богданова Л.А. и др.**  
Электронно-лучевые технологии в фармакологии.  
Гидрофильные гели полиэтиленоксида  
и иммобилизованные ферменты ..... 40
- Ауслендер В.Л., Брызгин А.А., Сербин В.И., Воронин Л.А.**  
Электронно-лучевая стерилизация медицинских изделий  
однократного применения с использованием ускорителей ИЛУ .... 44
- Салимов Р.А., Черепков В.Г.**  
Использование ускорителей электронов  
для радиационной дезинсекции зерна ..... 47
- Ванюшкин Б.М., Куксанов Н.К., Иванченко В.А. и др.**  
Использование ускорителей электронов в процессах  
очистки муниципальных и промышленных сточных вод ..... 49
- Ляхов Н.З., Салимов Р.А., Спиридонов Г.А.**  
Электронно-лучевая технология очистки газовых выбросов  
тепловых электростанций от окислов серы и азота ..... 54
- Борисов В.А., Сирота Г.А., Финкель Э.Э. и др.**  
Ускорители электронов типа ЭЛВ и ИЛУ в процессах  
производства и переработки полимеров ..... 57

На 1-й стр. обложки. Установка электронно-лучевой стерилизации медицинских изделий однократного использования с ускорителем ИЯФ типа ИЛУ-6 (Ижевский мотозавод). Вид конвейера для транспортировки медицинских изделий.

# ЭЛЕКТРОННО – ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, РАЗРАБОТАННЫЕ И/ИЛИ РЕАЛИЗОВАННЫЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫМИ И ЗАРУБЕЖНЫМИ ФИРМАМИ НА БАЗЕ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ ИНСТИТУТА ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

## *Производство материалов и изделий*

- \* Провода и кабельные изделия повышенной термостойкости с полиэтиленовой, хлорвиниловой и силиконовой электроизоляцией для использования в самолетостроении, космическом аппаратостроении, судостроении, радиоэлектронике, атомной энергетике и других отраслях промышленности
- \* Термоусаживаемые трубки, шланги, манжеты, пленки, ленты (в том числе с клеящим подслоем) для электромонтажа, защиты от коррозии магистральных и внутригородских трубопроводов для изоляции стыков труб и ремонта полимерных покрытий трубопроводов, упаковки машиностроительных изделий, строительных материалов и продуктов питания
- \* Рулонные композиционные материалы и искусственные кожи для спецодежды, чехлов, тентов, укрытий, кровли промышленных и коммунальных зданий, одежды, обуви, галантереи и др.
- \* Рулонные электроизоляционные материалы на основе силиконовых каучуков для электромонтажных работ
- \* Шнуры и профили сложной геометрии для уплотнения разъемов, дверей, люков всех видов транспорта и атомной энергетики, в том числе из силиконовой резины
- \* Кремнеорганические мономеры
- \* Кормовые добавки из целлюлозосодержащего сырья
- \* Носители магнитной записи для электронной промышленности
- \* Углеродно-волоконный материал «Углевом» (сорбент) для медицины и химической промышленности
- \* Полимерные уплотнения для герметизации разъемов магистральных газопроводов и различных гидросистем
- \* Катализатор синтеза аммиака
- \* Радиационный регенерат бутилкаучука для шинной и строительной промышленности
- \* Фольгированный и нефольгированный рулонный стеклотекстолит для изготовления многослойных и гибких печатных плат, крупноформатных полосковых плат
- \* Трубы напорные полимерные, армированные непрерывными волокнами диаметром до 450 мм
- \* Термо- и химостойкие трубы для горячего водоснабжения и транспортировки агрессивных жидкостей
- \* Адгезивно-активные полимерные пленки для антикоррозионной защиты, позволяющие использовать различные клеящие составы
- \* Гели на основе полиэтиленоксида для медицины, парфюмерии и техники
- \* Препрег на основе углеродных, стеклянных и других волокон
- \* Фоторазрушаемая пленка для сельскохозяйственных работ
- \* Термостойкая полимерная сетка для замены сеток из цветного металла в фильтрах двигателей внутреннего сгорания
- \* Полимерные мембраны для громкоговорителей радиоаппаратуры с высоким качеством звучания
- \* Фильтры тонкой очистки технологических растворов и питьевой воды из полиэтилена (типа «Здоровье»)
- \* Пенополиэтилен марки ППЭ-Р
- \* Полиэтиленовый материал щеток для обработки резинотехнических изделий при сверхнизких температурах
- \* Металлоорганопластики
- \* Адгезивно-активные пленки марки ОМ и ДМО

## *Процессы производства*

- ❖ Вжигание пассивных элементов гибридных электронных схем
- ❖ Обработка невытравленной овечьей шерсти с получением осветленного шерстяного жира и ланолина
- ❖ Обеззараживание осадков избыточного активного ила систем биологической очистки сточных вод
- ❖ Очистка сточных вод от биологически стойких поверхностно-активных веществ
- ❖ Очистка сточных вод красильного производства
- ❖ Обеззараживание сточных вод свиноводческих комплексов
- ❖ Очистка отходящих газов тепловых электростанций, металлургических заводов от окислов серы и азота
- ❖ Дезинсекция зерна
- ❖ Стерилизация медпрепаратов и различных медицинских изделий разового пользования (шприцы; системы переливания крови и др.)
- ❖ Производство иммобилизованных лекарств
- ❖ Наплавка износостойких и коррозионно-стойких покрытий на металлы
- ❖ Исправление дефектности при производстве монокристаллов
- ❖ Производство ультрадисперсных порошков
- ❖ Отверждение лакокрасочных материалов на плитах из различных материалов
- ❖ Изготовление декоративных покрытий без использования органических растворителей
- ❖ Модификация и производство цемента
- ❖ Модификация изделий из оксидной (корундоцирконоиттриевой и др.) керамики для инструментальных целей
- ❖ Производство литий-титановых ферритов повышенного качества для СВЧ-техники
- ❖ Обработка минерального сырья (в целях уменьшения энергозатрат при помоле и увеличения извлекаемости)
- ❖ Модифицирование заготовок лент для производства автомобильных шин
- ❖ Производство геля полиэтиленоксида различного назначения и др.



**Ускоритель электронов ИЯФ  
типа ЭЛВ-8 для промышленных  
технологических линий**

**Ускоритель ИЯФ типа ИЛУ  
для 4-стороннего облучения труб,  
термоусаживаемых трубок  
и проводов**

