

Использование ускорителей в медицине и народном хозяйстве

Е. Г. КОМАР

(Государственный комитет по использованию атомной энергии СССР)

Использование ускорителей заряженных частиц в медицине в сочетании с другими методами лечения оказывается весьма эффективным. Применение ускорителей для практических целей в промышленности и сельском хозяйстве позволяет осуществить ряд новых технологических процессов и значительно удешевить производство. При этом затраты на сооружение ускорительных установок обычно окупаются в течение первого года эксплуатации. Несмотря на это, ускорители применяются еще в ограниченном количестве. Можно назвать три причины медленного развития ускорительной радиационной технологии.

Прежде всего, надежные, дешевые и удобные в эксплуатации ускорители появились только в последние годы. В настоящее время промышленность многих стран, в том числе и СССР, уже производит ускорители в достаточном количестве и ассортименте для того, чтобы полностью удовлетворить растущий спрос.

Второй и, по-видимому, самой важной причиной является незначительное количество разработанных технологических процессов.

И, наконец, третья причина связана с недостаточной информированностью специалистов и носит чисто психологический характер. Это — боязнь радиационных процессов, неверие в их эффективность и безопасность. Однако статистика последних лет показывает, что число сдаваемых в эксплуатацию ускорителей растет. Это понятно, так как:

1) ускорители могут быть выключены в любой момент, после чего они безопасны, допускают осмотр, ремонт и другие работы;

2) энергия, интенсивность и тип излучения могут изменяться в широких пределах, в том числе и по заданной программе;

3) потоком излучения можно управлять с помощью электромагнитных линз, устройством сканирования и т. п.;

4) с помощью ускорителей могут быть получены любые сколь угодно мощные пучки, необходимые для получения высокой производительности процессов;

5) ускорители имеют высокий коэффициент использования пучка — порядка 70%.

Производительность облучения может быть подсчитана по следующей известной формуле:

$$M = \frac{\epsilon P}{3R},$$

где M — производительность установки, $m/ч$; ϵ — коэффициент использования пучка; P — мощность пучка, $квт$; R — доза, полученная продуктом, $Мрад$. Так, например, ускоритель мощностью 10 $квт$ при дозе 20 $Мрад$ и $\epsilon = 0,75$ может облучать в час 125 $кг$ материала. Для дезинсекции зерна требуется доза в 1000 раз меньшая (20 $крад$). В этом случае ускоритель мощностью в 10 $квт$ может облучать 125 t зерна в час.

К недостаткам электронных ускорителей следует отнести сравнительно малую глубину проникновения электронов в толщу облучаемого материала. Как известно, глубина проникновения

$$l = \frac{0,35W}{d},$$

где W — энергия электронов, $Мэв$; d — плотность вещества, $г/см^3$. При $W = 10 Мэв$, $d = 1 г/см^3$ $l = 3,5 см$. Для большинства процессов указанная глубина достаточна. Многие процессы требуют поверхностного облучения. В ряде случаев толщина материала мала (пленка, лента), и поэтому возможно применение ускорителей низких энергий до 1 $Мэв$. В случае необходимости для облучения материалов большой толщины электронное излучение может быть конвертировано в мощное тормозное излучение.

Ускорители электронов для медицины

В настоящее время в Советском Союзе разрабатываются, выпускаются и находятся в эксплуатации в медицинских учреждениях линейные ускорители электронов трех моделей (ЛУЭ-5, ЛУЭ-15 и ЛУЭ-25) и бетатроны двух моделей (Б5М-25 и Б1М-45). Основные медикотехнические характеристики этих ускорителей приведены в табл. 1.

Ускоритель ЛУЭ-5 позволяет вести статическое и ротационное облучение. Он работает в режиме тормозного излучения и имеет выход электронов для проведения исследовательских работ. Многолетняя эксплуатация ускорителя в клинических условиях показала высокую надежность работы оборудования. Обы-

но проводится до 50 сеансов облучения в смену.

Ускоритель ЛУЭ-25 является универсальной медицинской установкой, обеспечивающей прецизионную радиотерапию тормозным излучением и электронами. Формирование радиационных полей облучения производится двумя терапевтическими головками, позволяющими создавать поля тормозного излучения любой конфигурации и получать поля электронов без примеси тормозного излучения методом статического электромагнитного рассеяния.

В настоящее время заканчивается разработка линейного ускорителя электронов (ЛУЭ-15) для медицинских целей, который позволит осуществлять статическое, ротационное и ротационно-тангенциальное облучение. Мощность дозы изменяется по заданной программе в зависимости от положения источника излучения. Малые размеры электронного пятна на мишени, стабилизация его положения, а также прецизионное коллимирование пучка тормозного излучения позволяют получить равномерное радиационное поле любой конфигурации с резко очерченными границами. В ускорителе предусматриваются системы автоматического ввода в режим и обнаружения неисправностей.

Бетатрон типа Б5М-25 серийно выпускается промышленностью, бетатрон типа Б1М-45 находится в стадии разработки. Эта машина позво-

Основные медико-технические характеристики линейных ускорителей и бетатронов

Таблица 1

Ускоритель	Энергия электронов, Мэв	Энергия квантов тормозного излучения, Мэв	Мощность дозы ионизирующего излучения на расстоянии 1 м, р/мин		Максимальный размер поля облучения, см ²
			для электронов	для тормозного излучения	
ЛУЭ-5	5	5	—	300	18×18
ЛУЭ-15	15	15	—	300	30×30
ЛУЭ-25	10—30	10,15 20,25	50—500	50—500	20×20
Б5М-25	10—23	7—25	300	40	18×18
Б1М-45	10—45	10—42	500	125	20×20

лит вести статическое, ротационное и тангенциальное облучение. Обе машины имеют дистанционное управление коллимирующими диафрагмами и световую индикацию дозного поля.

Ускорители для практических целей

Общие характеристики ускорителей. В табл. 2 приводятся основные характеристики нескольких ускорителей, выпускаемых в СССР и используемых для дефектоскопии, активацион-

Общие характеристики ускорителей для практических целей

Таблица 2

Порядковый номер	Название ускорителя	Тип ускорителя	Энергия ускоренных электронов, Мэв	Средняя мощность в пучке, квт	Импульсная мощность в пучке, квт	Выход рентгеновского излучения на расстоянии 1 м от мишени, р/мин	Диаметр пучка мишени, мм	Габариты ускорителя, м		Вес ускорителя, т
								диаметр	длина	
1	РТД-1	Резонансный трансформатор	1,0	3	18	60	0,25	0,9	1,5	0,9
2	«Электрон-1»	Трансформатор	0,7	7	7	—	—	0,7	3,0	1,0
3	«Элит-500»	То же	0,5	1	700	18	—	0,3	0,5	0,04
4	«Элит-1»	»	1,0	8	10 000	360	—	0,4	0,6	0,12
5	«Элит-3»	»	2,5	10	40 000	—	—	1	1,3	0,8
6	ЭЛТ-2	»	1,5	25	215	—	—	1,3	2,4	7,0
7	КТЭ-2,5	Каскадный генератор	2,5	20	20	—	—	3,0	6,2	32,0
8	ЛУЭ-8-5В	Линейный ускоритель	8,0	5	3 500	—	—	5,0·0,7·1,75		2,0
9	ЛУЭ-13-9	То же	13,0	9	11 000	—	—	5,5·1,5·2,35		5,0
10	ЛУЭ-10-1	Линейный ускоритель	10,0	1	1 000	2 000	1,5	2,75·1,0·0,8		2,0
11	ЛУЭ-15-1,5	То же	15,0	1,5	1 500	10 000	2,0	4,5·1,5·2,0		5,5
12	Б-25	Бетатрон	25,0	—	—	40	—	—		2,5
13	Б-35	»	35,00	—	—	250	—	—		5,0
14	Б-50	»	50,0	—	—	800	—	—		20,0

ного анализа, создания новых технологических процессов, повышения продуктивности сельского хозяйства, а также для других практических целей.

Технологические процессы, допускающие большую мощность дозы, могут быть обеспечены ускорителями типа «Элит» (электронный импульсный трансформатор). Однако в ряде случаев импульсные и средние мощности пучка не могут значительно различаться. Некоторые технологические процессы не допускают больших мощностей дозы. В этих случаях необходимо выбирать ускорители типа РТЭ (резонансный трансформатор — ускоритель электронов), «Электрон» (каскадный умножитель напряжения с индуктивной связью) и КГ (каскадный генератор). Ускоритель типа «Электрон» поставляется с собственной биологической защитой и может быть установлен в любом помещении.

Дефектоскопия. Дефектоскопия отливок, поковок, сварных швов и других элементов изделий, прочность которых должна быть гарантирована, может осуществляться ускорителями, приведенными в табл. 2 под № 1, 3, 4, 10—14. Основными показателями этих ускорителей являются мощность дозы рентгеновского излучения и размер сечения пучка на мишени. Первая цифра определяет время экспозиции, вторая — чувствительность метода. Так, например, для ускорителя РТД-1 при мощности дозы 60 *p/мин* и размере сечения пучка 0,25 *мм* чувствительность при просвечивании лучше 2% от толщины. Это означает, что при толщине стали 150 *мм* может быть обнаружена неоднородность структуры металла с размером 3 *мм*.

Самыми мощными дефектоскопами из машин, указанных в табл. 2, являются ускорители № 10 и 11, в которых мощность дозы равна соответственно 2000 и 10 000 *p/мин* на расстоянии 1 *м* от мишени. Эти ускорители позволяют в течение нескольких секунд обеспечить просвечивание больших массивов при высокой чувствительности.

Активационный анализ. Активационный анализ является одной из эффективных областей применения ускорительной техники. Он используется в металлургии и геологоразведке для быстрых и точных анализов содержания элементов. Существуют транспортабельные и стационарные лаборатории активационного анализа.

Транспортабельные лаборатории используются для работы в полевых условиях. В Советском Союзе для этих условий выпускаются гене-

раторы типа НГИ с откачными вакуумными трубками в двух вариантах — с заземленной мишенью и мишенью, находящейся под напряжением. Генераторы работают в импульсном режиме с длительностью импульса 1—2 *мксек* и частотой 10—30 *гц*. Плотность потока нейтронов непосредственно около мишени порядка 10^7 *нейтр/см²*, что вполне достаточно для работы в полевых условиях. Энергия нейтронов — 14 *Мэв*. Чувствительность генератора при определении в рудах алюминия — 0,5%, меди — 0,05%, титана — 1,5%, марганца — 1%. Чувствительность при определении содержания кислорода в меди $1 \cdot 10^{-3}\%$. Для стационарных лабораторий активационного анализа выпускаются нейтронные генераторы типа НГ-150. Основные данные этого генератора приведены ниже:

Напряжение ускорителя	150 <i>кв</i>
Ток ионного пучка на мишени	3 <i>ма</i>
Диаметр пучка на мишени	5—25 <i>мм</i>
Поток нейтронов при D—T-реакции	$2 \cdot 10^{11}$ <i>нейтр/сек</i>
Потребляемая мощность	8 <i>квв</i>
Расход воды	350 <i>л/ч</i>
Вес ускорителя	0,5 <i>т</i>
Общий вес нейтронного генератора	1,3 <i>т</i>

Стационарная лаборатория на основе этого генератора позволяет проводить анализ содержания кислорода и азота с чувствительностью до $1 \cdot 10^{-5}\%$.

В качестве универсального источника излучения различных типов для активационного анализа может быть использован разрабатываемый в настоящее время в СССР компактный циклотрон. Основные параметры циклотрона приведены ниже:

Энергия ионов гелия-3	8—26 <i>Мэв</i>
Энергия протонов	5—18 <i>Мэв</i>
Энергия ионов дейтерия	3—10 <i>Мэв</i>

Циклотрон имеет высокую интенсивность внутреннего и внешнего выведенного пучка соответственно до 1 *ма* и 50 *мкв*.

Некоторые радиационные технологические процессы, разработанные и применяемые в СССР. Перечислим кратко некоторые из тех радиационных процессов, которые в настоящее время разработаны, применяются или начинают применяться на базе ускорителей, приведенных в табл. 2. Здесь не упомянуты те процессы, которые в настоящее время находятся в стадии исследования и разработки.

1. Как известно, обработка полиэтилена при дозе 10—30 *Мрад* повышает теплостойкость материала до 250—300°С при сохранении (и даже улучшении) его механических и электрических свойств. Этот процесс применяется при производстве теплостойкого кабеля и пленок, потребляемых различными отраслями промышленности и сельского хозяйства. Энергия ускорителя выбирается с учетом толщины материала.

2. Завершается изготовление линейных ускорителей типа ЛУЭ-8-5В (см. № 8, табл. 2) для стерилизации продукции. Предполагается стерилизация хирургических инструментов и другого медицинского оборудования. Доза облучения при стерилизации 2,5—3 *Мрад*.

3. Предполагается применение радиационно-химического процесса для получения стеклопластика. Этот процесс упрощает технологию и улучшает качество продукции. Производительность труда по сравнению с химическим способом производства увеличивается в 2,5 раза. Необходимая доза облучения — 7 *Мрад*.

4. Радиационная обработка резины в процессе ее вулканизации обеспечивает высокую устойчивость продукта к старению и износу. Как показали исследования, для отдельных сортов резины эта устойчивость повышается на 20—30%.

5. Разработана технология и начато производство самослипающейся изоляционной ленты из полигетеросилоксана толщиной 0,2—0,5 мм. Новая лента заменяет традиционную в электромашиностроении микаленту. После облучения электронами при энергии 500 *кэв* дозой 5 *Мрад* лента становится липкой. Через двое суток изоляция, выполненная из этой ленты, без какой-либо дополнительной обработки становится монолитом. Такая изоляция может длительно работать при температуре 300°С и кратковременно — при 600°С. Стоимость новой изоляции в два раза меньше обычной, выполненной на основе слюды. В качестве ускорителя при производстве самослипающейся ленты применен каскадный генератор на 500 *кэв*, данные которого в табл. 2 не приводятся.

Применение ускорителей в сельском хозяйстве

В качестве примера мы рассмотрим здесь только одно направление — облучение электронами картофеля перед посадкой для стимуляции прорастания и перед закладкой на хранение для подавления прорастания.

Облучение картофеля. В СССР в течение семи лет проводятся лабораторные, вегетационные, полевые и хозяйственные опыты по облучению клубней картофеля электронами. Определена оптимальная энергия облучения — 0,7—1,0 *Мэв*. При этой энергии электроны проникают в глубь клубня на 3—4 мм. Доза, поглощенная внутренними слоями клубня и связанная с тормозным излучением, не превышает 0,1% дозы, полученной поверхностными слоями. Таким образом, при электронном облучении масса картофеля, употребляемая в пищу, практически не облучается.

Облучение может быть использовано для достижения двух целей: 1) облучения семенного картофеля перед посадкой для повышения урожая; 2) облучения клубней картофеля перед закладкой на хранение для предотвращения прорастания и порчи.

При небольших дозах облучения (75—300 *рад*) происходит стимуляция ростовых процессов, приводящая к повышению урожая от 15 до 30% и более, а также к повышению содержания сухих веществ на 1,5—2%, крахмала — на 1—1,5% и витамина С — на 4—5 *мг%*. При облучении более высокими дозами (10—20 *крад*) вследствие подавления ростовых процессов значительно увеличиваются сроки хранения (практически до нового урожая) без ухудшения качеств продукта. При облучении клубней в октябре дозой 20 *крад* и при хранении до сентября следующего года содержание крахмала уменьшается только на 2,5%. В контрольных, необлученных, клубнях это содержание уменьшается на 24,9%. Содержание витамина С в облученных клубнях также больше, чем в необлученных. В качестве ускорителя для облучения картофеля при массовом применении этого процесса предполагается использовать РТД-1 (см. № 1, табл. 2).

В настоящее время разработана методика лечения больных с помощью ускорителей и сформулированы требования к соответствующей комплексной ускорительной установке.

Многие технологические процессы с использованием потоков заряженных частиц уже разработаны, а требования к соответствующей аппаратуре сформулированы. Продолжается исследовательская работа по созданию новых процессов и новых направлений использования ускорителей. Поэтому следует ожидать, что в ближайшие годы применение ускорителей в медицине, промышленности и сельском хозяйстве будет развиваться быстрыми темпами.