

Радиоизотопы и радиационная технология в промышленности

Сообщение о мало известных, но широко используемых видах их промышленного применения

Жак Гизерикс, Витомир Маркович и
Петер Эрэй

Промышленная радиационная технология основана на использовании излучений в качестве источника энергии, необходимой для того, чтобы вызвать требуемые химические, физические и биологические изменения. Применение же изотопов (как в виде герметизированных источников, так и в виде индикаторов) основано на измерении физических сигналов различными дозиметрами.

Например, в бумажной и сталелитейной промышленности используются тысячи систем контроля, основанных на нуклеонике для повышения качества продукции и эффективности производства путем постоянного измерения веса бумаги на единицу площади или толщины стали. Многие десятки тысяч измерительных приборов позволяют проводить измерения в сложных условиях, например, в коррозионной среде или принимать простые, надежные и недорогие решения по их использованию, которые обеспечили бы их конкурентоспособность по сравнению с нерадиоактивным оборудованием. Широкое применение нашел метод неразрушающего контроля, классическим компонентом которого является гаммаграфия и который наряду с другими неядерными методами используется всеми современными лабораториями, специализирующимися в этой области.

Многие из этих методов, предусматривающих использование герметизированных источников низкой и высокой активности (от нескольких милликюри до нескольких кюри) хорошо известны широкой общественности*. Настоящая статья посвящается тем видам радиационной технологии и применения меченых атомов, которые мало известны, но широко используются в промышленности.

Г-н Гизерикс — руководитель Секции промышленных применений излучений и химии Отдела физических и химических наук; г-н Маркович — сотрудник этой секции. Г-н Эрэй — сотрудник Отдела МАГАТЭ по технической помощи и сотрудничеству.

*Кюри — единица скорости распада изотопов. Один кюри эквивалентен 37×10^9 распадов в секунду или 37 гигабеккерелям.

Промышленное применение радиации

Влияние радиационной технологии на выпуск промышленной продукции сравнимо с применением других промышленных методов. Но ее проникающая способность и высокая производительность ставят ее в особое положение. Кроме того, для промышленного применения важны и такие факторы, как надежность в эксплуатации (ее использование составляет обычно не менее 90 %), контроль за процессами, эффективность и безопасность.

Некоторые виды радиационных источников отвечают всем этим требованиям. Можно с уверенностью сказать, что сегодняшняя радиационная техника и технология могут удовлетворить почти любые промышленные потребности. Основными источниками радиации являются кобальт-60 для гамма-излучения и ускорители электронных пучков (ЭП) для получения электронов высокой энергии от 0,15 до 10 мегаэлектронвольт (МэВ).

Источники и технология гамма-излучения. Здесь почти полностью доминирует кобальт-60. И такое положение, по-видимому, сохранится, так как другой изотоп, рассматриваемый как альтернатива кобальту-60, а именно цезий-137, не имеется в количествах, требуемых промышленностью. Хотя недавно такой коммерческий облучатель был внедрен в США, но маловероятно, чтобы в течение следующего десятилетия их количество увеличилось.

Гамма-излучение от кобальта-60 глубоко проникает в облучаемые материалы и очень удобно для обработки объемных и упакованных изделий. Основное его применение — промышленная стерилизация медицинских изделий разового пользования и, в меньшей степени, стерилизация фармацевтических препаратов, пряностей и другой продукции.

В мире насчитывается около 140 промышленных установок для радиационной стерилизации (примерно в 40 странах). Общая установленная активность этих установок составляет около $3 \cdot 10^{18}$ Бк или 80 МКи. Типовая промышленная установка с активностью в $3,7 \times 10^{16}$ Бк обладает мощностью излучения примерно в 15 кВт. Она

способна стерилизовать (при 2 Мрад) около 25000 — 30000 куб. метров материалов в год. Общая установленная активность функционирующих установок равна примерно $2,2 \times 10^{17}$ Бк (6 МКи или 90 кВт).

Другими видами применения являются облучение пищевых продуктов (несколько коммерческих и некоторое количество меньших, демонстрационных установок), дезинфекция сточных вод (один коммерческий облучатель в Федеративной Республике Германии и несколько опытных установок) и другие небольшие по масштабу или специального применения, например, при создании композитов дерево-полимер, полимеризации, радиационных прививках для сепараторов многокамерного полимеризатора; биомедицинские применения, вулканизация каучукового латекса.

Радиационные источники и технология с ЭП. Промышленное применение электронных пучков началось в 50-х годах для структурирования полиэтиленовой пленки (в целях получения пленки, дающей усадку при нагревании и идущей на упаковку) и проволоочной изоляции. Оно постоянно расширяется. Для различных коммерческих надобностей в настоящее время используются несколько сотен ускорителей ЭП. Разработаны два несхожих класса ускорителей и вида их применения.

● **Ускоритель ЭП на низкие энергии.** В диапазоне энергий от 0,15 до 0,5 МэВ площадь обработки изделий полностью защищается и радиационная защита становится составной частью ускорителя. Такие ускорители относительно невелики по объему и не требуют много места. Они могут быть легко размещены на любой рабочей площади или имеющихся производственных линиях. Полезная сфера действия электронов в указанном диапазоне энергий очень невелика (менее 1 мм), и их применение ограничивается облучением поверхностных слоев. Типичными видами применения являются структурирование тонких пластиковых пленок и проволоочных изоляций, отверждение покрытий на пленке, дереве, пластике, металле и др., отверждение покрытий на бумаге и пленках с выделением кремния, отверждение красок для офсетной печати и адгезивов для изготовления слоистых материалов.

Технология радиационного отверждения заменяет ультрафиолетовую технологию в тех случаях, когда используются пигментированные покрытия или требуются очень высокие скорости производства. В таких видах применения, как отверждение адгезива между деревянной панелью и фольгой или бумагой с одновременным закреплением верхнего защитного покрытия, облучение невозможно заменить каким-либо другим методом. Созданы ускорители ЭП большой мощности (300–500 кВт) на энергии в диапазоне до 0,3 МэВ. Коммерческие ускорители легко достигают производительности порядка 1000 метров в минуту (при 10 килогреях поглощенной дозы). Эти машины положительно зарекомендовали себя также на обработке топоч-

Предполагаемые годовые потребности в кобальте-60 для различных промышленных применений



Источник: АЕСИ

Предполагается, что потребность в кобальте-60 для медицинской стерилизации достигнет прогнозируемого уровня или даже превзойдет его (как это было в период 1983–1985 гг.). Проблема сохранения пищевых продуктов и очистки отходов зависит от целого ряда внешних факторов. Фактические данные на 1987 г. будут, по-видимому, ниже прогнозируемых величин.

Ускорители электронов в Японии



Применение	Ускорители электронов		Число компаний
	Количество	Общая мощность (кВт)	
Проволоочный и кабельный изолятор	30	1600	13
Пенополиолефин	10	338	3
Трубы и листы, дающие усадку	7	480	5
Предварительная вулканизация шинного каучука	6	410	4

ных газов в целях защиты окружающей среды (см. статью по этому вопросу, помещенную в этом же выпуске Бюллетеня МАГАТЭ).

• Ускорители ЭП в диапазоне энергий от 0,5 до 10 МэВ. Продаваемые машины такого рода могут достигать мощностей до 200 кВт. Площадь облучения окружается толстой бетонной защитой (1,5–2 метра). Эти установки применяются в настоящее время многими отраслями промышленности, производящими пластики, автомобили, резиновые изделия, нефтехимическую продукцию, проволоку, кабели. Основное применение они находят в радиационном структурировании пластмасс (проволочная и кабельная изоляция; материалы, дающие усадку при нагревании; полиэтиленовые трубы для горячей воды, пенопласт и др.), вулканизации резины, модификации, объемных полимеров (контролируемая деградация).

Большая часть ускорителей для таких применений находится в диапазоне энергий от 0,5 до 4 МэВ.

Некоторые из них используются для облучения пищевых продуктов (дезинфектация зерна в СССР и деконтаминация кормов для скота в Израиле). Попытки использовать ускорители для очистки сточных вод не дали до настоящего времени положительных результатов, но окончательные выводы по этой проблеме еще не сделаны. Ускорители с диапазоном энергий 600–800 кВт содержат, по-видимому, большие возможности в деле защиты окружающей среды, в частности, для обработки топочных газов.

Некоторые линейные ускорители электронов (ЛУЭ) используются для стерилизации медицинских изделий (в Великобритании, США, Франции, Дании и Польше). Однако из-за их высокой стоимости и низких уровней энергии они не находят такого широкого применения, как машины с постоянным током и на низкие энергии. Рост применения электронных пучков наблюдается в Японии, как показано ниже.

Радиационная технология в развивающихся странах

Передача радиационной технологии развивающимся странам происходит в различной мере в зависимости от технологии, страны, имеющейся в ней инфраструктуры и многих других внешних факторов. Радиационная стерилизация достигла наиболее высокой стадии развития в коммерческом отношении. Около 20 стран эксплуатируют в настоящее время 25 коммерческих гамма-установок с кобальтом-60 для стерилизации медицинских изделий.

Другие области промышленного применения не так хорошо развиты и располагают очень небольшим числом коммерческих установок.

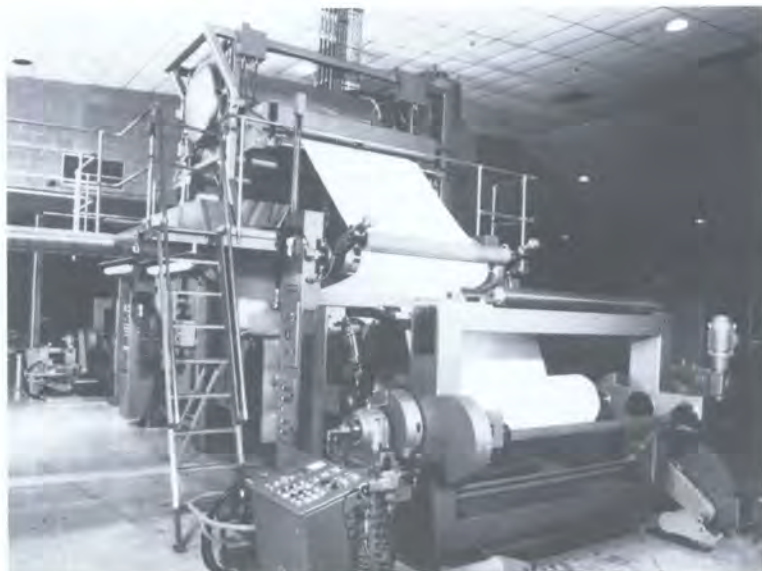
Агентство продолжает оказывать активное содействие в передаче радиационной технологии. Одним из наиболее эффективных средств является осуществление региональных проектов. Примером может служить проект по Программе развития ООН (ПРООН) для Азии и района Тихого океана и Региональное соглашение о сотрудничестве (РСС) МАГАТЭ. За последние пять лет были подготовлены в различных областях радиационной технологии около 140 специалистов. Только в 1986 г. были проведены восемь национальных семинаров по радиационной стерилизации и отверждению. Еще больше семинаров и учебных курсов планируется провести в 1987–1991 гг. В результате в регионе определились и начали осуществляться несколько промышленных проектов.

Промышленное применение меченых атомов

Решая проблемы транспортировки материалов, инженеры часто сталкиваются с необходимостью в абсолютных измерениях „массового потока”. Поскольку такую информацию нельзя получить непосредственно, организуется точно известный

Характер информации от меченых атомов			
„Да – Нет”		доказательство реальности связей между 2 совокупностями	
Аналог		установление количественной связи между 2 совокупностями	
Вопросы	Сигнал	$f(t)$ *	Примеры
Связь?		Нет	• обнаружение утечек
Связь? Где?		Нет	• автордиография
Связь? Где? Сколько?		Нет	• автордиография + денситометрия
Сколько?		Нет	Метод разбавления • взвешивание ртути в электролизерах
Сколько? Когда?		$f(t)$	• измерение скорости потока
Сколько? Когда?		$f(t)$	Системный анализ • функция потока массы
Сколько? Когда?		$h(t)$	• распределение времени перемещения
Связь? Где? Сколько? Когда?		$f(txy)$	• дисперсия загрязняющих веществ при полировке наборным кругом

* $f(t)$ – временная зависимость



Процессор электронных пучков для радиационного отверждения (Фото: Energy Sciences, Inc.)

дополнительный поток, который можно измерить — „радиоактивные индикаторы”. Но прежде необходимо установить связь между данными потока индикатора и соответствующего массового потока.

Информация меченых атомов передается в виде сигналов, которые могут быть электрическими, т.е. выходом детектирующего устройства, или вариациями в темноте ядерной эмульсии как в автордиографии (см. прилагаемую диаграмму о видах информации, предоставляемой мечеными атомами).

В качестве примера рассмотрим проблему обнаружения утечки в теплообменнике, в котором имеются два потока жидкости в двух контурах. Возникает простой вопрос: существует ли связь между двумя этими потоками? Ответ — да или нет, а наличие утечки обнаруживается тогда, когда индикатор, введенный в первый контур, обнаруживается во втором.

Более сложные применения меченых атомов позволяют проводить *системный анализ* — метод, основанный на использовании реакции системы на возбуждение, вызываемое на входе в данную систему. Представим постоянный поток воды в смесителе на химическом заводе. Концентрация данного вида смеси меняется на входе в систему. Здесь же вводится импульс этого вида с мечеными атомами, а на выходе измеряется концентрация. Эта функция определяет распределение времени прохождения (РВП) данного вещества и является наилучшим „образцом массообмена”, который может быть получен. Зная вариации концентрации на входе в систему, ее можно использовать для расчета вариации концентрации на выходе.

РВП системы лучше всего определить методом меченых атомов. Легко понять значение такой функции, если она позволяет использовать при анализе проблем время пребывания и дисперсию.

Можно найти применение этим явлениям в промышленности, например, в смесителях или для того, чтобы свести к минимуму их число, когда по трубопроводу транспортируются партиями различные виды нефти.

Метод радиоактивных индикаторов имеет следующие преимущества:

первое — их концентрация может быть измерена детекторами, располагаемыми вне трубопроводов или емкостей; второе — измерение образцов из потока просто и независимо от матрицы образцов; третье — радиоактивные индикаторы уникальны в отношении мечения специфического элемента или химического продукта.

Например, в исследованиях коррозии стальных сплавов при нагревании сера метится изотопом $S=32$ и обнаруживается автордиографией на границах раздела зерен. Получаемая в результате использования радиоактивных индикаторов информация обычно значительно дороже по стоимости, чем информация, полученная с помощью нерадиоактивных индикаторов.

Радиоактивные индикаторы применяются с разрешения соответствующих национальных органов. Очень малые концентрации и короткие периоды полураспада применяемых обычно индикаторов делают возможным использование значительно менее низких уровней по сравнению с максимальными допускаемыми уровнями.

Статус промышленного применения меченых атомов

Как показывается в подготавливаемом в настоящее время МАГАТЭ справочнике, меченые атомы представляют интерес для большинства отраслей промышленности (см. график). Этот справочник составляют 20 авторов из одиннадцати стран: Великобритании, Германской Демократической Респуб-

лики, Израиля, Индии, Нидерландов, Польши, Соединенных Штатов Америки, Федеративной Республики Германии, Финляндии, Франции и Чехословакии. Меченые атомы применяются и в других странах. Справочник показывает, что практически все отрасли промышленности применяют меченые атомы, причем 68 % приходится на химическую технологию, а остальная часть — главным образом, на металлургию, разведку минералов, защиту окружающей среды и санитарии.

Индикаторы применяются в лабораториях, например, при исследованиях механизма кинетической и химической реакции, на заводах для обнаружения и устранения неполадок (обнаружение утечек, блокировка трубопроводов), для определения характеристик контуров (скорости потоков, неподвижный объем, соотношение ветвей распада, обходный путь) и для оптимизации процессов и управления ими. Они используются лабораториями для проведения исследовательских работ, а также правительственными или частными учреждениями, предоставляющими услуги на коммерческой основе. К числу коммерческих организаций относятся „Физика и радиоизотопы” ICI в Великобритании, Комиссариат по атомной энергии Франции, частная компания в Индии, занимающаяся лишь определением наличного количества ртути, и частная компания в Финляндии, специализирующаяся на измерениях скорости потоков. Успешная деятельность таких предприятий, работающих на основе закона спроса и предложения, — лучшее свидетельство экономической выгоды применения меченых атомов.

В развивающихся странах промышленное применение меченых атомов очень различно. Одни из них достигли уровня самых передовых в этой области государств, например, Чили, Индия и Польша; другие придерживаются, как и некоторые развитые страны, того правила, что „постоянная времени” в 15–20 лет всегда необходима для внедрения новой технологии. Определенная дополнительная задержка вызывается также экономическими соображениями и отсутствием необходимой информации. Тем не менее, достигнуто в этой области немало (см. прилагаемую таблицу применения данной технологии в Азии и районе Тихого океана).

Справочник по радиоактивным индикаторам, применяемым в промышленности

МАГАТЭ готовит в настоящее время широкий справочник по применению радиоизотопных индикаторов в промышленности, охватывающий круг вопросов от методологии применения меченых атомов до конкретных исследований для промышленного использования.

Основные разделы справочника:

- Концепция меченых атомов
- Общая технология меченых атомов
- Методология меченых атомов (меченые атомы и системный анализ, моделирование основного потока, информация о меченых атомах в моделировании крупных систем, информация о меченых атомах в решении сложных проблем, процессы с различными потоками и объемами)
- Общие виды применения (использование моделей потоков, оценка параметров, скорость потока, материальные балансы, характеристика и использование твердых индикаторов, эффективность смешения, обнаружение и устранение неполадок, диффузия, проницаемость, распределение частиц по размерам, коррозия и поверхностные явления, использование изотопов в механистических и кинетических исследованиях, двухфазовые потоки, управление процессом, кинетические параметры)
- Конкретные исследования (химическая промышленность, бумажная и целлюлозная промышленность, нефтяная промышленность, цементная промышленность, металлургическая промышленность, энергетика, электронная промышленность, механика, технология защиты окружающей среды и санитарии, минералогия)
- Наблюдаемые тенденции в разработках и применении

Дополнительная информация о справочнике может быть получена в Секции МАГАТЭ по промышленным видам применения излучений и химии.



Некоторые виды промышленного применения радиоизотопов в Азии и районе Тихого океана

Промышленность	Применение	Изотоп	Страна	Примечание
Нефть	Профили водозабора в скважинах для инъекции воды	Барий-131 (микросферы)	Китай	К середине 1985 г. испытано 3095 скважин; к 1990 г. предполагается 10000
Нефть	Нахождение утечки в 140-километровом трубопроводе для сырой нефти (Вирамгам-Койяли)	Бром-82	Индия	5 кюри/километр; в результате 24-часовой герметизации и промывки утечка была найдена в пределах одного метра
Нефть	Нахождение утечки		Шри Ланка	
Нефть	Утечки в подземных скважинах	Сурьма-124 (трифенил сурьма) йод-131 йодо-бензол	Китай	5 полевых испытаний с 1968 г.
Природный газ	Распределение коррозии относительно агента в трубопроводе	Вода, насыщенная тритием	Китай	
Нефтехимия	Обнаружение засора в трубопроводе	Кобальт-60	Индия	3-х метровый источник для обнаружения нафталиновых пробок от нефтеемисительных заводов Тромбей до комплекса NOCIL, Новый Бомбей
Машиностроение	Измерение износа в двигателях внутреннего сгорания	Нейтронная активация (активация тонкого слоя)	Индия	Широкая программа, включающая определение износа опор поршневых колец, оборудования для инъекции топлива, клапанов
Машиностроение	Измерение потребления масла		Индия	Эффект номинальной нагрузки и скорости, тормоза, исследование мощности в лошадиных силах
Машиностроение	Наивысшая рабочая температура и распределение температуры в подвижных частях	Криптон-85 (имплантация)	Китай	
Геотермальная энергетика	Динамика миграции реинжектируемой воды (геотермальной)		Филиппины	
Энергетика	Измерение эффективности турбин	Бром-82 Насыщенная тритием вода	Индия	Объемный расход потока с помощью разбавления меченых атомов в сочетании с другими измерениями при точности $\pm 1\%$ на гидроэлектростанции вблизи Бомбей
Энергетика	Проверка на сдвиг парогенератора на атомной электростанции	Натрий-24	Республика Корея	
Железо и сталь	Влияние облицовки ковша на качество стали	Кальций-45	Китай	Включение продуктов эрозии облицовки ковша в сталь; предположительно экономия в 1,3 млн. юаней на материалах облицовки
Железо и сталь	Влияние кальция на закупорку сопла во время отливки раскисленной алюминием стали	Кальций-45	Китай	Экономия определена в 52000 юаней в год
Железо и сталь	Коррозия некоторых сплавов. Сплавы железа на основе никеля, сплавы на основе никеля с содержанием ниобия	Сера-35 (серноокислый натрий)	Китай	
Железо и сталь	Определение износа огнеупорной футеровки в доменной печи; изучение источников включений огнеупоров; определение сдвига шлаков в жидком металле		Индия	Радиоактивные индикаторы использовали пять основных сталеплавильных заводов: Жамшедпур (TISCO), Роуркела, Дургапур, Бхилаи, Бокаро (SAIL) (TISCO)
Береговая техника	Изучение песков и отложений в открытом море для создания гаваней и навигационных каналов	Иридий-192 (стекло)	Индонезия	Широкое применение
Береговая техника	Изучение движения илов для выработки стратегии выемки грунта и оказания помощи в проектировании навигационного канала	Скандий-46 Золото-198 (песок)	Индия	Включая и исследования гаваней Чочин и Мармугао
Береговая техника	Изучение движения песков	Кобальт-60 (стекло)	Республика Корея	Исследования ведутся в портах Муко и Сам Чонг и в заливе Янг

Промышленность	Применение	Изотоп	Страна	Примечание
Химическая промышленность	Определение количества ртути в электролитических элементах	Ртуть-197	Индия	Проводится на коммерческой основе
Химическая промышленность	Определение количества ртути в электролитических элементах	Ртуть-197	Китай	
Химическая промышленность	Определение параметров процесса и рабочих характеристик установки		Индия	Включая распределение времени пребывания, разбавление, скорость потока в „Сенчери реион“
Химическая промышленность	Характеристика смешения мочевины в реакторе	Двуокись углерода-14	Республика Корея	Завод по производству удобрений в Чанг Ю
Технология водных ресурсов	Нанесение на карту контуров инфильтрации перед Педу Дам	Золото-198	Малайзия	Идентифицированы основные зоны инфильтрации и линии ее движения
Технология водных ресурсов	Определение основных зон инфильтрации в бассейне Киунг	Насыщенная тритием вода	Республика Корея	
Технология водных ресурсов	Измерение скорости потока в линиях канализационных труб	Натрий-24	Филиппины	
Технология водных ресурсов	Измерение водосброса в реках и ирригационных каналах	Технеций-99m	Малайзия	Работа проводилась на реках Семених и Луи для Управления ирригации и дренажа, и на каналах для Управления развитием сельского хозяйства Кемулена (KADA), Келантан
Электроника	Утечка в полупроводниках	Криптон-85	Китай	
Электроника	Утечка в полупроводниках	Криптон-85	Таиланд	

Эта таблица показывает некоторые виды применения радиоизотопов в развивающихся государствах — членах МАГАТЭ, участвующих в реализации Региональной совместной программы в Азии и районе Тихого океана (региональное соглашение о сотрудничестве). В таблице неполные данные, поскольку не включены Австралия и Япония — два государства — доноры программы. В числе не включенных видов применения радиации: „закрытый источник“, радиография, ядерное калибрование, каротаж буровых скважин.