

НЕКОТОРЫЕ ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

Ю. Э. Пенионжкевич

Объединённый институт ядерных исследований, Дубна

Applied Aspects of Nuclear Physics

Yu. E. Penionzhkevich

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna

В статье рассказывается об использовании методов ядерной физики в различных областях науки, техники, промышленности. Показаны возможности этих методов для точного определения содержания элементов в различных образцах, производства радиоизотопов для медицины, получение и использование ядерных мембран. Демонстрируемые использования ядерных излучений доказывают их широкие возможности в решении самых разных проблем, в том числе и экологических.

The paper reviews the application of some nuclear physics techniques in different scientific and technical investigations, and industry. The many possibilities these methods give for the exact determination of elemental abundances in different samples, the production of radio-isotopes for medicine, and the manufacturing of nuclear membranes. These applications of nuclear radiation prove that they can be widely used in solving a multiplied variety of problems, including ecological.

Введение

Представление о ядерной физике у многих людей складывалось под влиянием наиболее яркого и трагического использования этой науки для создания атомной бомбы. Между тем, с момента открытия радиоактивности супругами Кюри в 1895 году, ядерная физика и большинство её фундаментальных результатов внесли решающий вклад в развитие многих областей науки, техники и медицины. Стоит вспомнить в связи с этим использование рентгеновских лучей в медицине, эффекта Мёссбауэра для анализа структурных особенностей твёрдых тел, радиоизотопный метод определения возраста различных объектов, активационный метод определения элементного состава вещества с высокой чувствительностью (до 10^{-10} г/г), не говоря уже об использовании ядерной энергии для получения электроэнергии. Во многих странах этот источник энергии даёт более 50% от всей электроэнергии производимой в стране. В настоящее время физики-ядерщики всех стран работают над созданием нового эффективного метода получения электроэнергии с помощью управляемого термоядерного синтеза. Этот список можно было бы ещё и ещё продолжать. Поэтому необходимо совершенно четко представлять себе, что ядерная физика настолько тесно вошла в нашу жизнь, что без неё уже немислимо наше цивилизованное существование. Настоящая статья не претендует на полное описание всех возможностей методов ядерной физики в решении важных для общества проблем. В ней представлены лишь некоторые направления, развиваемые с

помощью методов ядерной физики — это активационный анализ изотопного состава вещества, получение радиоизотопов для медицины и производство специальных микрофильтров. Эти важные направления использования результатов фундаментальных исследований ядерной физики и физики тяжёлых ионов в частности успешно развиваются в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флёрва Объединённого института ядерных исследований в Дубне и в других ведущих научных центрах мира.

Активационный анализ

Активационный анализ основывается на ядерных взаимодействиях и свойствах возбуждённых (радиоактивных) атомных ядер. Современные методы ядерной физики, располагающей большим набором источников активирующего излучения, позволяет осуществить активационное определение практически всех элементов периодической системы. Активация образцов может осуществляться различными источниками излучения — γ -квантами, нейтронами, лёгкими заряженными частицами и тяжёлыми ионами. Испускаемое же после активации в основном γ -излучение является характеристическим, что даёт возможность по параметрам излучения (энергия, период полураспада и интенсивность) проводить идентификацию элементов и определение их количественного содержания. Необходимо заметить, что активационный анализ относится к числу наиболее чувствительных аналитических методов. Предел обнаружения для большинства

элементов находится в интервале 10^7 — $10^{10}\%$. Однако эти высокие аналитические параметры активационного анализа могут быть достигнуты с помощью относительно дорогого и сложного в эксплуатации оборудования ядерных реакторов, ускорителей заряженных частиц, детекторов ионизирующих излучений высокого разрешения, методов обработки, позволяющих экспрессно идентифицировать характеристическое излучение. Активационные методы анализа используются для решения широкого круга задач в самых разных направлениях науки и техники [1].

В основе активационного метода анализа лежит использование ядерных взаимодействий. Исследуемый образец облучают потоком ядерных частиц или гамма-квантов. В результате взаимодействия активирующего излучения с ядрами элементов возможно протекание различных ядерных реакций, которые приводят к изменению состояния облучаемых ядер (изменение их нуклонного состава или энергетического состояния ядер). При этом используются ядерные реакции различных типов [2]. В процессе взаимодействия испускаются нейтроны, протоны или α -частицы, а также более тяжёлые ядра (случай упругого рассеяния), регистрация характеристик которых даёт количественную информацию о заряде и массе ядра, с которым произошла ядерная реакция. Возникший в результате ядерного взаимодействия продукт представляет собой радиоактивный изотоп исходного или соседних элементов, распадающийся с вылетом α -частиц (для тяжёлых ядер) или характеристического рентгеновского и γ -излучения, по которым эти ядра идентифицируются. Зная сечение (вероятность) реакции и поток активирующего излучения можно определить количество исследуемых ядер. Таким образом активационный анализ может использоваться для анализа чрезвычайно малых количеств вещества (до $\sim 10^{-10}$ г/г). Как было отмечено выше, количественное определение возможно по мгновенному и задержанному излучению. В первом случае исследуемая проба помещается в поток активирующего излучения и измеряется интенсивность вторичного излучения. Соотношение между числом регистрируемых детектором вторичных частиц и количеством изотопа определяется соотношением:

$$N_1 = \eta \cdot \phi \cdot \sigma N_0 \quad (1),$$

где η — выход вторичного излучения, ϕ — плотность потока активирующего излучения (частиц/см² · сек), σ — сечение реакции на данном ядре, N_0 — число исходных ядер.

Во-втором случае, который является наиболее распространённым, в активационном анализе, проводится измерение интенсивности характеристического излучения радиоизотопов, образующихся в процессе облучения.

Например при облучении ядер **A** частицами **a** у нас образуется новое ядро **B** и испускается частица **v**, т. е.

протекает ядерная реакция типа **A(a, v)B**, которая характеризуется определённой величиной сечения активации. Конечный продукт этой реакции **B** радиоактивен и имеет постоянную распада λ . Скорость накопления ядер радиоизотопа будет определяться двумя процессами: скоростью образования в результате реакции и скорости распада при радиоактивном распаде:

$$dN_B/dt = \Phi \sigma N_A - \lambda N_B \quad (2)$$

количество ядер радиоизотопа **B**, накопившееся за время облучения $t_{обл.}$ можно получить интегрированием уравнения (2). В этом случае в предположении о постоянстве плотности потока активирующего излучения (Φ), а также сечения (σ) и числа начальных ядер (N_A) количество ядер **B**:

$$N_B = (\Phi \sigma N_A / \lambda)(1 - e^{-\lambda t_{обл.}}) \quad (3)$$

После облучения измеряется число распадов в течении определённого промежутка времени ($t_{изм.}$), что даёт зависимость:

$$N_d = (\Phi \sigma N_A / \lambda)(1 - e^{-\lambda t_{изм.}}) \quad (4)$$

Если число атомов радиоизотопа за время измерений уменьшается в незначительной степени ($t_{изм.} / T_{1/2}$ мало), то $(1 - e^{-\lambda t_{изм.}}) \approx \lambda t_{изм.}$ и уравнение (4) можно записать в виде:

$$N_d / t_{изм.} = A_d \quad (5),$$

где A_d — скорость распада или активность радиоизотопа.

Нетрудно видеть, что при длительности облучения, значительно превышающей период полураспада радиоизотопа ($t_{обл.} \gg T_{1/2}$) из соотношений (4) и (5) можно получить

$$A_\infty = \Phi \sigma N_A \quad (6),$$

где A_∞ — активность насыщения. Это уравнение (6) совпадает с уравнением (1) для интенсивности мгновенного излучения. Это значит, что результат можно быстрее получить измеряя мгновенное излучение, чем в случае предварительного облучения и последующих измерений задержанного излучения. К сожалению использование первого метода связано с большими методическими трудностями, вызванными необходимостью регистрации вторичного излучения на фоне на много порядков превышающего по интенсивности первичного излучения.

Экспрессность активационного анализа и его высокая чувствительность позволяет использовать его в самых разных областях науки и техники.

Прежде всего следует отметить большой вклад в геохимию и космохимию. Информация о содержании

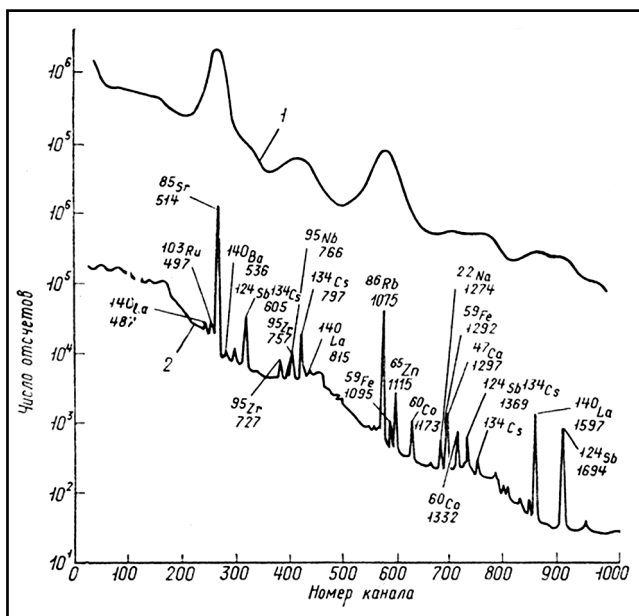


Рис. 1. Гамма-спектр пробы морской воды, змеренный с помощью полупроводникового спектрометра. Пики в спектре соответствуют изотопам различных элементов, присутствующих в воде.

малых концентраций элементов в земных недрах даёт возможность делать выводы о геохимических процессах и оказывает помощь при поисках месторождений редких и рассеянных элементов. В последнее время активационный анализ является одним из основных методов при изучении химического состава вещества, доставленного с поверхности Луны. На рис. 1 показан характерный спектр гамма-излучений пробы морской воды, из которого следует высокое содержание в ней широкого спектра самых разных элементов, в том числе и редкоземельных, что позволяет надеяться на возможность промышленного использования морской воды для добычи многих редких элементов.

Велика роль активационного анализа для биологии, медицины и смежных с ними наук. Они заинтересованы в определении содержания малых компонентов, роль которых в биологических процессах велика. Широко используется активационный анализ в криминалистике. Большие перспективы активационного анализа в промышленности, где область его использования простирается от поиска полезных ископаемых до оперативного контроля за качеством готового продукта (например, содержания кислорода в продуктах металлургического производства). Необходимо заметить, что здесь используются в качестве источников активирующего излучения относительно недорогие и радиацион-

но-безопасные радиоактивные источники, генераторы нейтронов и γ -квантов (микротроны).

Получение и использование радиоактивных изотопов в медицине

С момента появления первых ускорителей заряженных частиц (более 60 лет назад) — они эффективно использовались при получении радиоизотопов для радиофармакологии. В настоящее время около 200 специальных малогабаритных циклотронов и 25 других ускорителей заряженных частиц работают для производства радиоизотопов в медицинских целях. Как правило, в этих ускорителях получают пучок протонов или дейтронов с энергией до 40 Мегаэлектронвольт и с интенсивностью пучка до 500 микроампер. На таких ускорителях получают радиоизотопы в количествах, достаточных для проведения диагностических исследований нескольких тысяч пациентов в год. Есть несколько проблем, которые необходимо решить при производстве и использовании радиоизотопов. Первая из них — высокая чистота, получаемых на ускорителях препаратов. Во время облучения вещества мишени в ядерных реакциях образуется большое количество разных изотопов, многие из которых являются нежелательными для внедрения в организм (например, большое время жизни). Для получения чистых препаратов (чистота до 10^6 — 10^7 г/г) подбирают ядерные реакции, в которых необходимый изотоп образуется с большим выходом. Очистку от других элементов осуществляют с помощью радиохимических методов, а изотопов с использованием магнитных масс-сепараторов. Вторая проблема состоит в том, что необходимо получать изотопы, живущие относительно малое время — от десятков часов до нескольких дней. Это необходимо для того, чтобы после введения их в организм человека и после проведения исследований эти радионуклиды должны распасться и прекратить своё радиоактивное воздействие на организм. Это требование чрезвычайно усложняет методику использования изотопа — нужны быстрые методы сепарации и доставки их от места производства до больницы, которые часто находятся на большом расстоянии друг от друга. Радиоизотопы в основном используются для двух целей — исследование метаболизма тех или иных элементов в организме человека и для диагностики состояния различных органов. В первом случае пациенту вводится определённый радиоизотоп в зависимости от того, какой орган предполагается исследовать. Этот метод основан на том, что каждый орган наиболее селективен к одному элементу. В таблице показаны основные радиоизотопы, получаемые на ускорителях для диагностики того или иного органа.

Изотоп	Время жизни (часы)	Энергия гамма излучения (КэВ)	Адсорбирующий орган
^{201}Tl	73,0	80	Сердце
^{111}In	67,2	240	Распространение инфекций
^{67}Ga	78,3	100—300	Желудок
^{123}I	13,2	160	Щитовидная железа

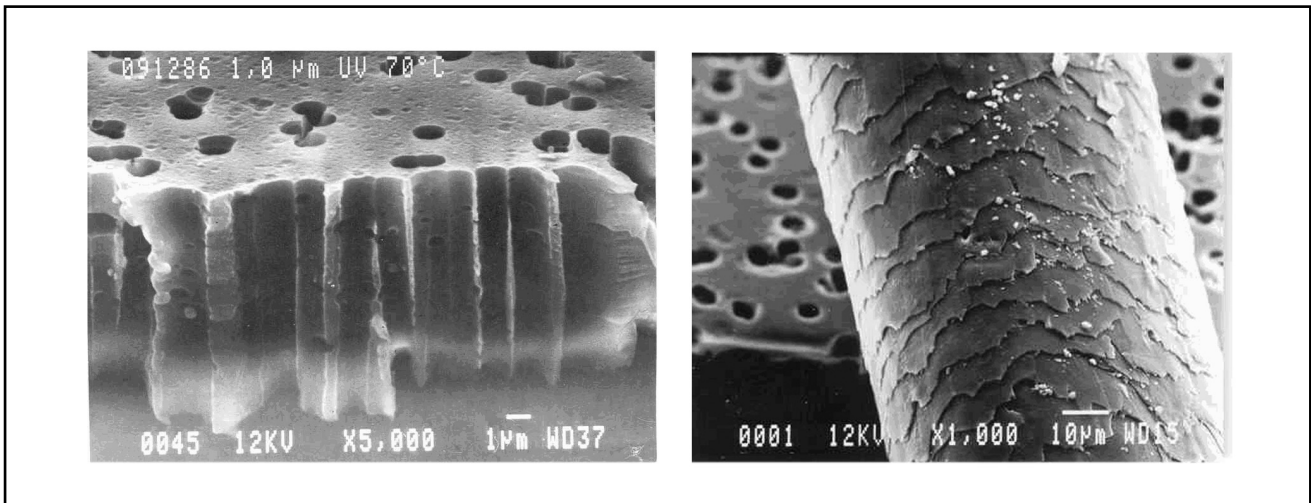


Рис. 2. Снимок ядерного фильтра под электронным микроскопом. Срез ядерного фильтра.

В правом нижнем углу белой линией показан масштаб снимка (слева). Снимок ядерного фильтра под электронным микроскопом на фоне человеческого волоса (справа).

В последнее время стали использоваться изотопы более тяжёлых элементов, например ^{237}Pu . Этот радионуклид с периодом полураспада $T_{1/2}=45,3$ дня применяется медиками для исследования метаболизма трансураниевых элементов в организме, что чрезвычайно важно при профилактике заболеваемости жертв крупных экологических катастроф (например, Чернобыльская АЭС, районы испытания ядерного оружия). Другая цель использования радионуклидов для диагностики — это позитронная томография. При обследовании больного методом позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) в определённый орган человека вводится один из короткоживущих изотопов углерод-11 (период полураспада — 20 минут), азот-13 (10 минут) или кислород-15 (2 минуты). Эти изотопы, распадаясь испускают одновременно два гамма-кванта с энергией 511 КэВ. Эти гамма-кванты измеряются специальными детекторами, расположенными вокруг тела человека. После сложнейшей обработки полученных сигналов от гамма-лучей, передаваемых на компьютер от большого количества детекторов, сигналы преобразуются в изображение органа. В отличие от рентгеновского снимка изображение это объёмное с высоким пространственным разрешением и абсолютно безопасно для организма. Здесь необходимо заметить, что использование радионуклидов в медицине является абсолютно безопасным ввиду очень малых доз и короткого времени жизни используемых радионуклидов.

Ядерные мембраны

Одним из наиболее ярких примеров использования ядерной физики в смежных областях является производство ядерных мембран. Мембранная фильтрация по совокупности своих технико-экономических показателей является технологией XXI века и является одним из направлений развития нанотехнологий. В настоящее время важнейшие процессы в точной технологии

(электроника, биотехнология, микробиология, фармацевтика и др.), медицине, сельском хозяйстве, экологии невозможно представить без применения широкой гаммы мембран. Так называемые ядерные или трековые мембраны являются особым типом искусственных полимерных мембран. От классических мембран, получаемых, в основном, методами химической технологии, ядерные мембраны отличаются высокой однородностью геометрических размеров и правильной формой пор, высокая селективность по отношению к выделяемому компоненту, биологическая инертность.

Что же такое ядерная мембрана, как они производятся и где используются?

В 1974 году в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флёрва ОИЯИ в г. Дубне впервые было предложено использовать для изготовления ядерных фильтров ускорители тяжёлых ионов [3, 4]. Тяжёлые ионы высокой энергии создают в веществе вдоль своих траекторий области с высокой плотностью ионизации, в которых происходит деструкция полимера. Специальная химическая обработка деструктированного ионизацией материала превращает исходную плёнку в микрофильтрационную со сквозными порами цилиндрической формы (см. рис. 2). Размеры пор и их плотность в ядерных мембранах можно регулировать путём выбора режима химической обработки и массы бомбардирующих ядер.

Для улучшения качества ядерных фильтров перед химической обработкой, плёнка подвергается облучению ультрафиолетовым светом — сенсбилизации. Сенсбилизация, связанная с процессом фотоокисления продуктов радиолитического распада в треках под действием ультрафиолетового света, позволяет в 3—5 раз повысить избирательность травления и снизить конусность каналов пор, т. е. получать поры идеальной цилиндрической формы. Одно из преимуществ ядерных фильтров состоит в том, что ядра ускоряемых ионов стабильны, а энергия их недостаточна для вступления в ядерные реакции с ядрами элементов

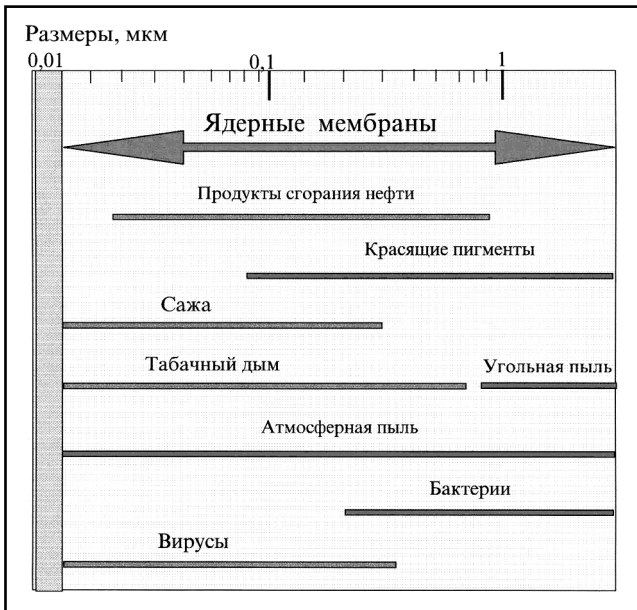


Рис. 3. Диапазон размеров пор ядерных фильтров в микронах в сравнении с характерными размерами частиц некоторых аэрозолей.

мишени. Поэтому полностью отсутствует активация полимерного материала в процессе облучения. К настоящему времени разработана технология изготовления ядерных фильтров с диаметром пор от нескольких десятков ангстрем до десятков микрон. Исходным материалом для производства ядерных фильтров служит, как правило, лавсановая плёнка. Она отличается высокой механической прочностью, устойчивостью к воздействию многих растворителей и реактивов, большой радиационной стойкостью. Ионизация, производимая тяжёлыми ионами вдоль их траектории в веществе настолько сильна, что даже в высокотермостойких и радиационностойких полимерах остаются дефекты, превращаемые в поры после соответствующей химической обработки. Эти уникальные свойства мембран позволяют их широко использовать в самых различных областях. Отметим лишь наиболее важное использование ядерных мембран.

Известно, насколько важна в современной электронной промышленности чистота технологических сред, в частности воды и воздуха. Присутствие посторонних веществ и частиц в процессе создания микросхем и полупроводниковых приборов оказывает существенное влияние на качество и выход продукции. В связи с этим на предприятиях электронной промышленности в качестве промывочной среды используется особо чистая вода, содержащая не более 50—150 микрочастиц (размером $\leq 0,2$ мкм) в миллилитре. Ядерные фильтры являются идеальным материалом для конечной очистки воды от микрочастиц. Это обусловлено тем, что, во-первых, ядерные фильтры с диаметром пор 0,2 мкм задерживают все микрочастицы большего размера, в том числе бактерии, во-вторых в отличие от большинства других фильтров они практически не вы-

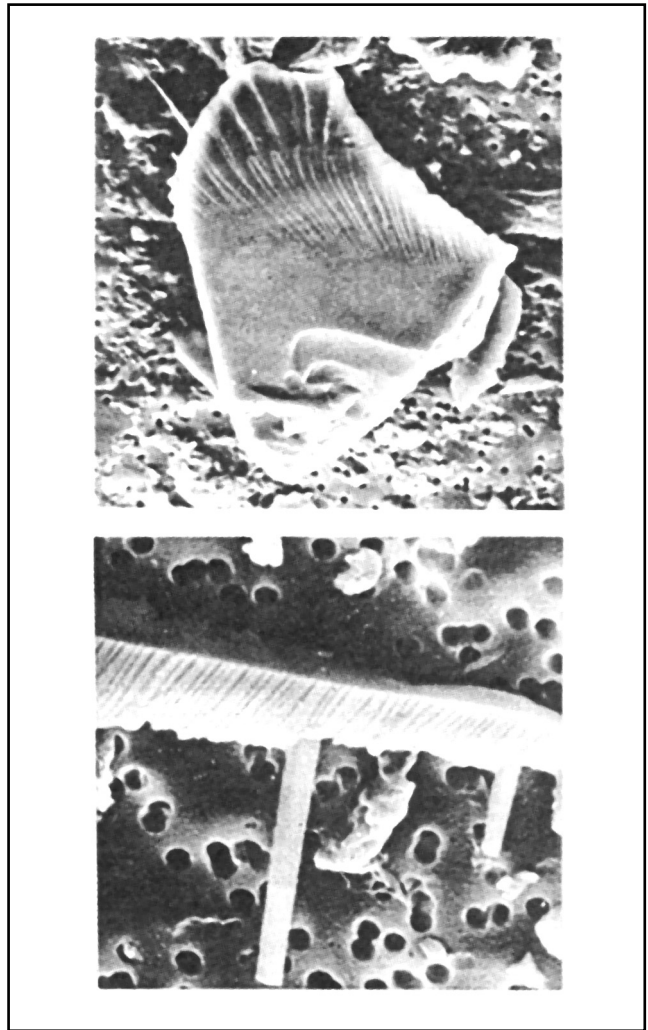


Рис. 4. Снимок поверхности ядерной мембраны (0,22 мкм) после фильтрации бактерий и осколков стекла ампулы с водой для инъекций.

деляют в фильтрат каких-либо низкомолекулярных примесей. Ядерные фильтры, используемые для этих целей, заряженные в специальный патрон имеют производительность более $0,25 \text{ м}^3$ чистой воды в час. На рис. 3 представлены размеры различных веществ и соответствующие им размеры ядерных мембран. Видно, что ядерные мембраны позволяют фильтровать самые различные вещества, аэро- и гидрозоли. Отсюда сразу следуют другие возможные области применения ядерных фильтров, важнейшей из которых является медицина. Ядерные фильтры обладают по сравнению с другими мембранами значительно меньшей (2—5%) дисперсией пор, и это делает их незаменимыми в процессах очистки, концентрирования и стерилизующей фильтрации вирусов и вакцин. На рис. 4 показаны фотографии поверхностей различных ядерных фильтров, снятых на электронном микроскопе при увеличении 10^4 раз. На поверхности ядерных мембран с диаметром пор 0,2 мкм задерживаются латекс, пыль, бактерии, осколки стекла из ампулы с водой для инъекций.

Всё это демонстрирует самые широкие возможности использования ядерных мембран. Кроме электронной промышленности и медицины они используются в работах по изучению и контролю загрязнения окружающей среды, в криогенной технике при изготовлении экранно-вакуумной изоляции, в пищевой промышленности при производстве ферментных препаратов, кормового лизина, стерилизации жидких пищевых продуктов и многих других областях.

Приведенные выше примеры использования ядерных технологий являются лишь малой частью тех ог-

ромных возможностей современной ядерной физики в решении важнейших задач современной науки и техники. Таким образом в настоящее время практически ни одна область науки, техники, производства, использующих высокие технологии, не может обходиться без методов ядерной физики. Эти методы продолжают развиваться и совершенствоваться с целью обеспечения полной безопасности при их применении. И в основном эта цель уже достигнута — прикладные методы ядерной физики во многих случаях оказываются более безопасными, экологически чистыми, чем конкурирующие с ними.

Литература

1. Кузнецов Р. А. Активационный анализ. Москва, Атомиздат, 1974.
2. Пенюнжевич Ю. Э. Соросовский образовательный журнал, т. 1, 1995, с. 92.
3. Флёрв Г. Н. Вестник Академии наук СССР, 4, 1984, с. 35.
4. Мведлишвили Б. В., Флёрв Г. Н. Журнал Всесоюзного химического общества им. Д. И. Менделеева, т. XXXII, 1983, с. 641.