

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

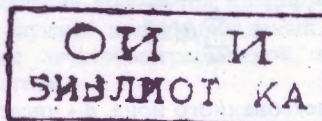
95-527

P12-95-527

В.В.Цупко-Ситников, В.А.Халкин, Т.А.Фурьев,
В.А.Антохов, Н.И.Журавлев, А.В.Саламатин,
В.Т.Сидоров, А.А.Стахин

УСТАНОВКА ДЛЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО
ЗОННОГО ЭЛЕКТРОФОРЕЗА РАДИОНУКЛИДОВ
В СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТАХ

Направлено в журнал «Review of Scientific Instruments»



1995

I. Введение

Общезвестно, что электрофорез - весьма эффективный метод сбора информации о физико-химических свойствах мигрирующих в электрическом поле ионов и их взаимодействии с растворами электролитов. Исследования такого рода обычно направлены на изучение процессов гидролиза и комплексообразования элементов в растворах, что является в настоящее время актуальной задачей для неорганической, физической и радиохимии.

При проведении электромиграционных исследований измеряется величина средней подвижности ионов изучаемого элемента в растворе при стабилизированных градиентах приложенного электрического поля, температурах и составах растворов. Термин "средняя подвижность" u подразумевает существование изучаемого элемента одновременно в нескольких ионных формах, находящихся между собой в лабильном равновесии, и выражается как

$$u = \sum_{i=1}^n u_i c_i$$

где u_i и c_i - индивидуальная подвижность и мольная доля i -й ионной формы; u имеет размерность $[cm^2 \cdot s^{-1}]$.

Важным преимуществом электромиграционного метода является возможность работать при ультранизких концентрациях элемента в растворе (менее 10^{-8} M), что очень важно при изучении процессов комплексообразования и гидролиза, так как полностью исключается возможность образования полиядерных соединений и, следовательно, облегчается интерпретация экспериментальных данных. В этих случаях, как правило, используются радиоактивные изотопы исследуемых элементов, что позволяет отслеживать их миграцию по γ или другим видам излучения. Именно применение радионуклидов позволяет работать практически при любых разбавлениях растворов, где концентрация исследуемого элемента ограничивается только соотношением эффект - фон.

Важнейшим результатом электромиграционных исследований можно считать определение индивидуальных подвижностей u_i и констант комплексообразования (гидролиза) элемента. В самом общем случае для лабильных систем величина u связана с равновесной концентрацией лиганда соотношением

$$u = \frac{u_0 + \sum_{i=1}^n u_i \beta_i [L]^i}{1 + \sum_{i=1}^n \beta_i [L]^i}$$

где u_0 - подвижность незакомплексованного иона, n - число типов комплексных частиц, β_i - полная константа устойчивости комплексного иона. Это уравнение

содержит $2n+1$ констант, все или часть которых неизвестны и могут быть определены на основании экспериментальных данных.

В Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований (Дубна, Россия) в последние годы успешно развивался новый вариант метода низковольтного зонного электрофореза радионуклидов в свободных растворах электролитов [1,2]. Его главной отличительной чертой является проведение электрофореза в растворах, свободных от мелкодисперсных гидродинамических стабилизаторов жидкости (волокон, порошки), применяемых подавляющим большинством исследователей. Величины подвижностей ионов, определяемые в таких условиях, не нуждаются в многочисленных эмпирических поправках, обычно вводимых при обработке результатов опытов. Применение такой техники работы значительно повысило точность получаемых экспериментальных результатов и определяемых на их основе физико-химических констант. В соответствии с жесткими требованиями к стабильности состава фонового электролита во время проведения измерений была разработана специальная конструкция электромиграционной ячейки [2], обеспечивающая это условие работы. Использование метода принесло целый ряд новых и интересных данных о состояниях следов элементов в водных растворах [3-7].

В настоящее время применение ряда новых подходов позволяет существенно расширить возможности метода, повысить точность и "производительность" эксперимента.

Данная работа посвящена описанию разработанного нами комплекса экспериментального оборудования, предназначенного для измерения подвижностей микроколичеств элементов в свободных растворах электролитов в электрических полях.

II. Аппаратурная организация и элементы электромиграционной установки

Блок-схема экспериментальной установки для измерения скоростей миграции ионов радионуклидов в водных растворах приведена на рис. 1. Ниже в данном разделе приведено развернутое описание ее наиболее важных узлов.

Установка состоит из электромиграционной ячейки (в центре схемы), подключенной к источнику стабилизированного высокого напряжения для создания в ячейке постоянного градиента электрического поля. Перистальтический насос обеспечивает постоянное обновление фонового электролита в приэлектродных камерах ячейки для поддержания его постоянного состава в электродных камерах и трубке ячейки осуществляется путем прокачки через охлаждающую рубашку воды из жидкостного термостата. Для определения положения мигрирующей вдоль трубки ячейки зоны радиоэлемента служит коллимированный γ -детектор, перемещение которого (сканирование электромиграционной трубки) производится при помощи шагового двигателя.

Система в целом управляется при помощи персонального компьютера.

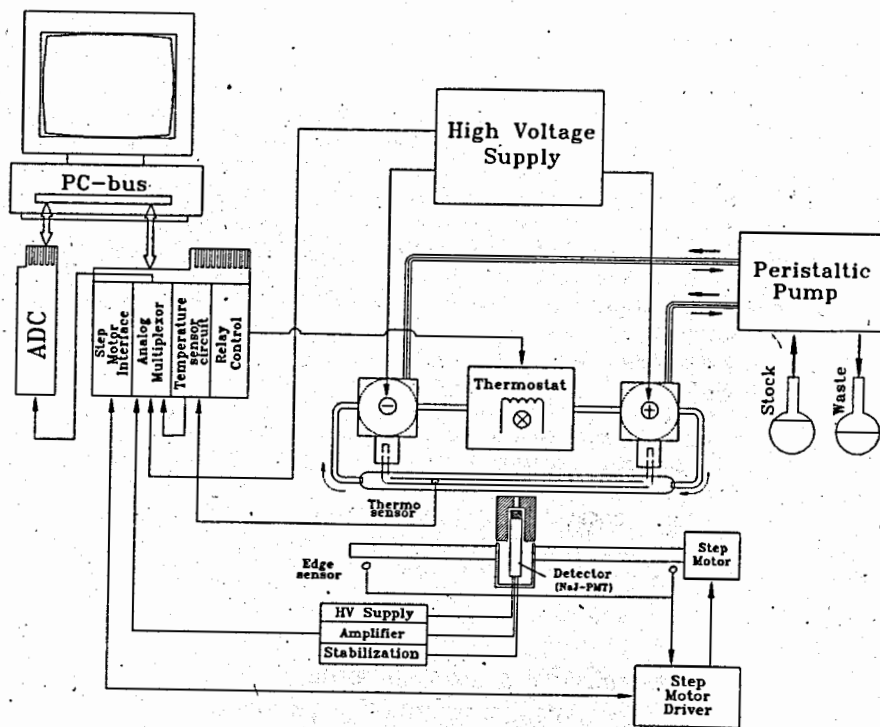


Рис. 1. Блок-схема электромиграционной установки. Сцинтилляционный γ -детектор, перемещаемый шаговым двигателем, сканирует трубку ячейки для определения положения зоны мигрирующего элемента. Температурный датчик малых размеров расположен непосредственно в электромиграционной трубке, сигнал с него после усиления подается на один из входов мультимплексора, коммутирующего входной канал АЦП. Сигнал с делителя источника высокого напряжения, а также усиленный спектрометрический сигнал подаются на входы мультимплексора

Управляющая и регистрирующая электроника смонтирована на двух платах, устанавливаемых в стандартные разъемы на материнской плате компьютера; на первой из них смонтирован аналого-цифровой преобразователь, а вторая содержит схемы интерфейса шагового двигателя и управления нагревателем жидкостного термостата, схему преобразования сигнала температурного датчика и коммутатор сигналов, подаваемых на АЦП.

Программное обеспечение предполагает создание на базе АЦП многоканального (4096 каналов) анализатора для приема и обработки поступающей с детектора спектрометрической информации, управление работой шагового двигателя, измерение температуры электролита в ячейке и управление термостатом для ее поддержания на заданном уровне, контроль величины подаваемого на ячейку высокого напряжения и on-line визуализацию всего комплекса получаемых экспериментальных данных. Программно-аппаратные средства позволяют также в широких пределах изменять режимы работы вышеуказанных узлов установки для ее приспособления к различным экспериментальным условиям.

А. Электромиграционная ячейка

Конструкция электромиграционной ячейки, примененной в настоящей работе (рис. 2), аналогична разработанной и описанной ранее в работе [2]. Ячейка состоит из двух электродных камер кубической формы, выполненных из полистирола, соединенных со стеклянной электромиграционной трубкой через тефлоновые переходные камеры 2 с фланцами. В качестве рабочих частей электродов 3 используются отрезки впаянной в стекло платиновой проволоки; стеклянные трубки электродов помещены в суживающиеся на концах электродные кожухи 4, центрируемые тефлоновыми крышками электродных камер. Стеклянные змеевики предназначены для поддержания температуры электролита в камерах примерно на уровне температуры в электромиграционной трубке.

Стеклянные концы электромиграционной трубки 1 герметично крепятся в торцах переходных камер посредством прижимных фланцев с уплотнением из кислотоустойчивой резины. Отверстия в верхней части переходных камер предназначены для эвакуации и заливки электролита в трубку ячейки.

Основная деталь ячейки - электромиграционная трубка - состоит из собственно трубки с внутренним диаметром 3,0 мм и окружающей ее рубашки 7, предназначенной для циркуляции воды из жидкостного термостата. Выведенные за пределы рубашки вертикальные патрубки предназначены для помещения во внутреннюю трубку температурных датчиков, электродов для измерения градиента напряжения, а также для введения раствора исследуемого радиоизотопа.

Система циркуляции фонового электролита. Ее основное назначение - обеспечить постоянство состава электролита во всей ячейке в течение длительного эксперимента. К быстрому изменению состава (рН) электролита может привести попадание в него продуктов электролиза, поэтому очень важным является их полное удаление из приэлектродной области. Это достигается путем постоянного отбора электролита из внутреннего пространства электродных кожухов 4 через патрубки 8, расположенные в непосредственной близости от электродов. Скорость отбора v подобрана таким образом, чтобы линейная скорость тока электролита в суженных частях кожухов превышала 30 см/мин, что значительно выше скорости миграции любых ионов при градиентах напряжения ≤ 20 В/см. Для компенсации оттока электролита из камеры служит подающий патрубок 9, через который поступает свежий электролит со скоростью $v \approx 1.2v$; для поддержания постоянного

уровня электролита в камере служит контрольный патрубок 10, работающий как сифон.

С целью устранения пульсаций, возникающих в электродных камерах при работе перистальтического насоса, между электродными и переходными камерами установлены гидродинамические сопротивления 11, изготовленные из ядерных ультрафильтров, получаемых облучением тяжелыми ионами полиэтилентерефталатной пленки с ее последующим щелочным травлением [8,9]. При изготовлении мембран была использована методика гидрофобизации путем радиационной прививки на их поверхность полистирола, что обеспечило устойчивость мембран в щелочных средах ($pH \leq 13$). В описываемой установке мы использовали мембраны толщиной 10 мкм с

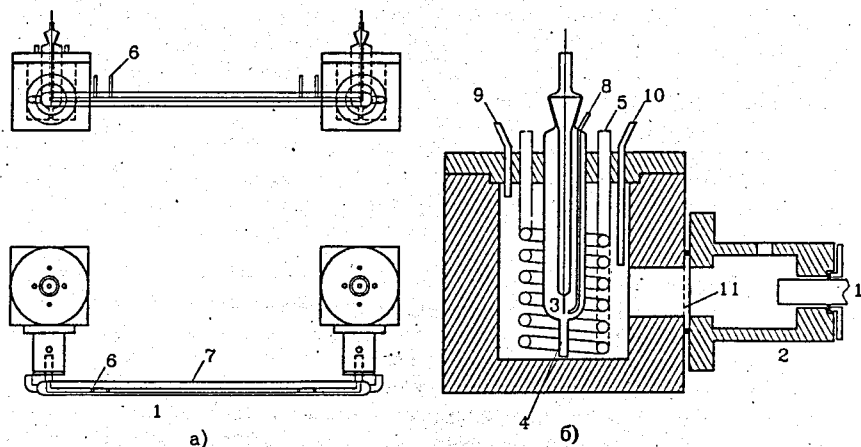


Рис. 2. Конструкция электромиграционной ячейки: вид спереди и сверху (а) и устройство электродной камеры (б). 1 - электромиграционная трубка, 2-переходная камера, 3-электрод, 4-электродный кожух, 5-термостатурующий змеевик, 6-патрубки, 7-термостатирующая рубашка, 8,9,10 - патрубки системы циркуляции электролита, 11-мембрана (см. пояснения в тексте).

диаметром пор 150-180 Å и пропускной способностью по воде 0.012-0.016 мл·мин⁻¹·см² при $\Delta P = 0.05$ МПа.

Градиент напряжения в трубке постоянно измерялся цифровым вольтметром с вводимыми в патрубки 6 платиновыми электродами.

Б. Система измерения и регулирования температуры

Необходимость точно измерять и стабилизировать температуру электролита в трубке ячейки обусловлена сильной зависимостью подвижностей ионов от температуры среды (~2% на 1°C [3]). Удаленность ячейки от основного объема термостата, а также значительное тепловыделение в

электромиграционной трубке (до 1 Вт/см) приводит к тому, что разность температур электролита в трубке и охлаждающей воды в термостате может достигать нескольких градусов. Это делает необходимым измерение температуры непосредственно внутри трубки (\varnothing 3 мм) и, следовательно, применение чувствительного термодатчика малых размеров. В качестве такового служит помещенный в тонкостенную стеклянную ампулу малагабаритный кремниевый диод (рис.3), питаемый постоянным током от генератора тока (рис. 4). При изменении температуры пропорционально изменяется сопротивление диода и, следовательно, падение напряжения на нем. Это напряжение усиливается операционным усилителем и преобразуется с помощью АЦП в цифровой код, который подается в ЭВМ [10]. Программная поддержка установки обеспечивает считывание и обработку текущего значения температуры электролита с периодичностью 1 раз в 1 секунду при любом режиме работы. Динамический диапазон измеряемых температур $0 \div +40^\circ\text{C}$, точность измерения составляет 0.01 °C. Градуировка линейного диапазона усилителя производится потенциометрами "SET 0" и "SET K" (рис. 4), первым из которых устанавливается нулевое напряжение на выходе усилителя при $T = 0.00^\circ\text{C}$, а вторым - напряжение +4 В при $T = 40.00^\circ\text{C}$.

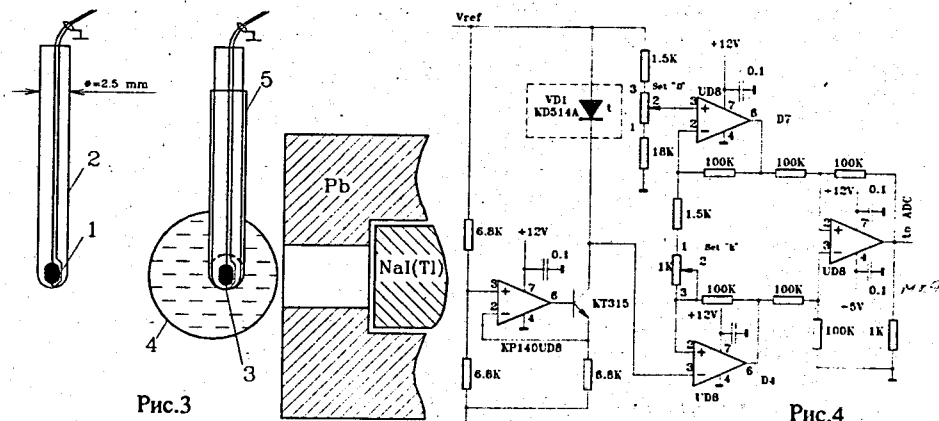


Рис.3. Конструкция температурного датчика и его расположение в электромиграционной трубке. 1 - кремниевый диод, 2 - стеклянная ампула, 3 - трубка электромиграционной ячейки, 4 - рубашка, 5 - патрубок для ввода датчика

Рис. 4. Схема включения датчика измерения температуры. Пояснения в тексте

Управление нагревателем жидкостного термостата осуществляется широтно-импульсным методом так, что продолжительность включенного состояния нагревателя T_{heat} устанавливается для каждого из следующих друг за другом без перерыва временных отрезков T_{step} , $T_{heat} \leq T_{step}$. Продолжительность периода T_{step} задается пользователем и обычно составляет 2-10 с. Для i -го периода T_{step}^i продолжительность T_{heat}^i вычисляется в конце $i-1$ -го периода по алгоритму

$$T_{heat}^i = \frac{T_h \cdot T_{step}}{T_h + T_c} + \frac{dT}{T_c}; \quad dT = \bar{T}_{i-1} - T_{stab},$$

где T_{stab} - поддерживаемое значение температуры, \bar{T}_{i-1} - среднее значение температуры за период T_{step} , T_h и T_c - скорость нагревания и самопроизвольного (при выключенном нагревателе) охлаждения системы в окрестности T_{stab} (определяются в автоматическом режиме перед началом эксперимента). Переменная T_c равна T_c , если $dT < 0$, и T_h , если $dT > 0$. Первое слагаемое в этом выражении обеспечивает учет соотношения скоростей нагревания и самопроизвольного охлаждения системы, а второе вносит коррекцию в величину T_{heat} в зависимости от отклонения текущей температуры от заданного значения. На рис.5 в сравнении показаны временная

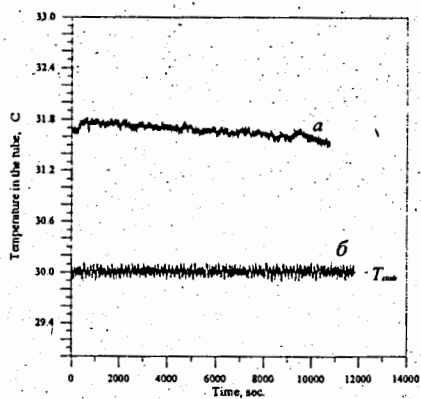


Рис.5. Временная зависимость температуры в электромиграционной трубке: а - при стабилизации температуры на уровне 30.0°С в ванне термостата; б - при термостатировании самой трубки

зависимость температуры внутри электромиграционной трубки T_{tube} при ее стабилизации на уровне $T_{stab} = 30.0^\circ\text{C}$ (кривая б) и временная зависимость этой же величины в том случае, когда на уровне 30.0°C поддерживается температура в ванне жидкостного термостата (кривая а). В последнем случае величина T_{tube} значительно превышает необходимое значение вследствие омического тепловыделения в трубке и не отличается необходимой стабильностью, что и обуславливает необходимость применения специальных датчиков для измерения и стабилизации температуры в ней.

В. Детектор ядерного излучения

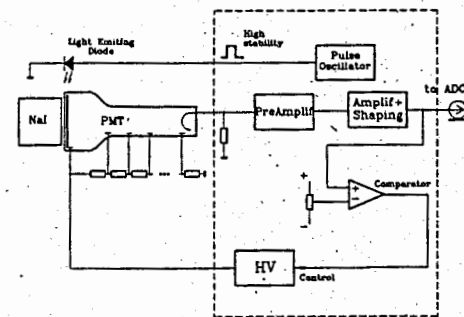
Устройство. В качестве детектора рентгеновского и γ -излучения используется сборка кристалла NaI (Tl) $\varnothing 25 \times 25$ мм с ФЭУ. Кристалл NaI коллимирован свинцовым коллиматором толщиной 25 мм с вертикальной щелью 1.5×25 мм, который предназначен для получения нужного пространственного разрешения при сканировании электромиграционной трубки. Условия эксперимента требуют стабильности спектрометрического тракта в течение длительных промежутков времени и, что особенно важно, при изменении загрузки детектора на 1-3 порядка. Для выполнения этого требования в спектрометрическом блоке (см. блок-схему на рис. 1) использована схема стабилизации (рис. 6) с применением в качестве реперного сигнала от светодиода, приведенного в оптический контакт с окном ФЭУ. Такая

стабилизация обеспечивает смещение пика с энергией 661.66 кэВ не более чем на 1% за 24 часа и не более чем на 1.5% при изменении загрузки детектора от 50 до 50000 соб/с. Энергетическое разрешение на энергии 661.66 кэВ составляет не более 8%.

Спектрометрический сигнал, преобразованный АЦП в код, считывается программой многоканального анализатора, обеспечивающей накопление спектра и (при необходимости) его визуализацию, а также энергетическую калибровку спектрометрического тракта.

Система перемещения. Детектор закреплен на подвижной площадке, перемещающейся по направляющим вдоль трубки электромиграционной ячейки. Площадка приводится в движение посредством червячной передачи, ведущий вал которой жестко соединен с валом шагового двигателя. Полная база перемещения детектора составляет 450 мм.

Шаговый двигатель управляется интерфейсом (см. рис. 1),



обеспечивающим формирование сигналов для вращения вала двигателя в прямом и обратном направлениях. Он содержит управляемый делитель частоты для получения нужных фазовых сигналов, а также схемы приема и обработки сигналов от двух пар датчиков крайних положений. В каждой паре один из датчиков предназначен для аварийной остановки двигателя в случае программного сбоя, а другой играет роль неподвижного репера для отсчета начального положения детектора. Фазовые сигналы подаются в шаговый двигатель через блок привода (рис. 1).

Линейная скорость перемещения детектора может варьироваться по желанию экспериментатора в пределах 0-6 мм/с с кратностью 5 мкм/с; точность позиционирования детектора составляет 0.1 мм. В процессе измерения подвижности мигрирующего радионуклида детектор осуществляет автоматическое возвратное сканирование трубки ячейки между предварительно заданными пользователем крайними положениями.

Основной рабочий режим. Основным рабочим режимом установки является возвратное сканирование детектором электромиграционной трубки между заранее заданными крайними положениями. При этом расстояние между этими точками разбивается программным образом на целое число одинаковых отрезков, длина Δl (или связанная с ней временная продолжительность Δt) которых задается пользователем одновременно с другими параметрами работы. Регистрируемой величиной является число событий, поступающих за время Δt в определенные окна γ -спектра. Одновременно может мониториться до 4 таких независимых окон, положение границ которых в спектре задается

пользователем перед началом измерений при просмотре полного γ -спектра исследуемого изотопа. Таким образом, во время измерений функцией анализаторной части программного обеспечения является накопление спектра в течение времени Δt , его обработка для определения числа событий, зарегистрированных в 4-х заданных его окнах, запись полученных значений в оперативную память и сброс анализатора для накопления спектра в течение следующего отрезка Δt . Для каждого из таких временных отрезков известно как точное расположение детектора в его начальный момент, так и точное астрономическое время, соответствующее началу его отсчета.

Результатом этого процесса является получение 4-х гистограмм распределения интенсивности γ -излучения по длине трубки ячейки для различных участков его спектра. Разрешение этого распределения по длине трубки определяется скоростью движения детектора и продолжительностью промежутка Δt ; значения этих параметров задаются пользователем, исходя из активности используемого препарата и необходимой точности определения положения мигрирующей зоны.

При обработке таких гистограмм, полученных при многократном сканировании трубки во время движения радиоактивной зоны, можно определить зависимость от времени величины пройденного ею пути и, следовательно, рассчитать подвижность исследуемого элемента в условиях данного опыта.

Использованная методика слежения за радиоактивной зоной только по определенным участкам спектра ее γ -излучения дает следующие преимущества (см. также иллюстрации в след. разделе):

- значительное повышение соотношения эффект-фон при установке окна в спектре на фотопик, лежащий в области 40-300 кэВ, что связано с отсечением проникающего через коллиматор жесткого излучения и большей части комптоновских импульсов;
- при работе со смесью изотопов двух различных химических элементов, имеющих в мягкой области разрешимые фотопики, можно по отдельности следить за движением этих элементов, что дает очень точную информацию об их относительном поведении в условиях данного опыта.

III. Экспериментальные результаты

С целью демонстрации функциональных возможностей описанной установки ниже мы приводим некоторые результаты проведенных на ней тестовых экспериментов:

а) миграция зоны радиоэлемента вдоль электромиграционной трубки. В эксперименте использовался радионуклид ^{133}Ba с целью определения индивидуальной подвижности катиона Ba^{2+} в перхлоратных растворах с низкой ионной силой. Электромиграционная ячейка была заполнена фоновым электролитом состава 0.1 М NaClO_4 - 10^{-3} М HClO_4 . После вывода установки на температурный режим ($T_{\text{stab}}=303^\circ\text{K}$) при градиенте напряжения 10.0 В/см и токе 12 мА в один из патрубков 6 (рис.2) были введены 2 мкл раствора бария-133 без

носителя с удельной активностью 1.0 мкКи/мкл. Сканирование трубки детектором в прямом и обратном направлениях производилось при скорости его перемещения 0.75 мм/с и продолжительности одного шага измерения 4 с. Слежение за миграцией зоны осуществлялось по одному энергетическому окну, установленному в спектре ^{133}Ba на линию 81.0 кэВ. На рис. 7,а представлены несколько гистограмм в координатах "расстояние-интенсивность"

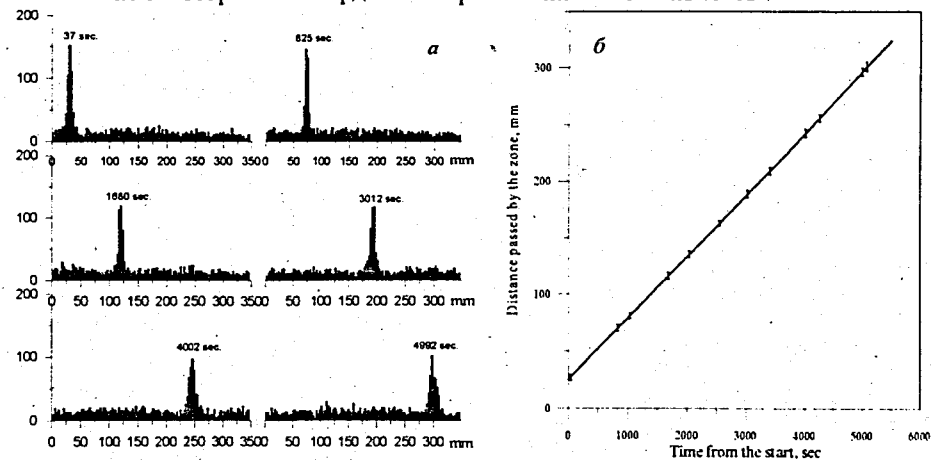


Рис.7. а- динамика движения зоны бария-133 вдоль электромиграционной трубки (10 В/см, 0.1 М р-р хлорнокислого натрия pH=3.0), б - полученные точки в координатах "время - расстояние" и аппроксимирующая их линейная зависимость.

излучения", полученных при сканировании электромиграционной трубки в различные моменты эксперимента. После завершения опыта (сканирование было выполнено 12 раз) полученные гистограммы были обработаны для расчета пространственных и временных положений центров тяжести зарегистрированных зон. Построенная по этим данным зависимость "время - пройденный путь" приведена на рис. 7,б. Рассчитанная по МНК для 12 полученных точек линейная зависимость ($\chi^2=0.26$) дала значение $\bar{u}=(5.51 \pm 0.06) \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

б) влияние положения энергетических окон, устанавливаемых в спектре исследуемого нуклида. На рис.8,а показана расстановка энергетических окон в спектре изотопа ^{152}Eu при проведении с ним эксперимента, аналогичного описанному в предыдущем разделе. Полученные для каждого из установленных окон гистограммы распределения интенсивности излучения по длине трубки приведены на рис. 8,б. Из этой иллюстрации видно, что получения максимального соотношения сигнал-фон и отображения реальной ширины зоны удается добиться при установке окон в спектре на мягкие фотопики большой интенсивности. При увеличении энергии фотопика соотношение сигнал-фон уменьшается за счет неполного подавления бокового излучения коллиматором и уменьшения эффективности детектора. Уширение регистрируемой формы мигрирующей зоны с ростом энергии фотопика

связано с краевыми эффектами на щели коллиматора. Очевидно, что оба эти эффекта являются нежелательными, так как снижают точность определения подвижности элемента.

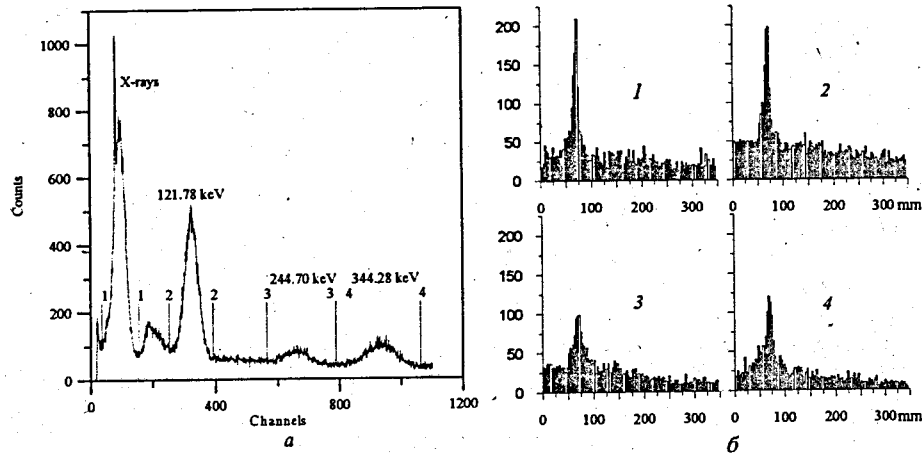


Рис. 8. Влияние положения установленного в спектре энергетического окна на регистрируемую форму зоны радионуклида в электромиграционной трубке: а - расстановка окон в спектре европия-152, б - полученные для каждого окна распределения интенсивности излучения (относительные единицы) по длине трубки (мм)

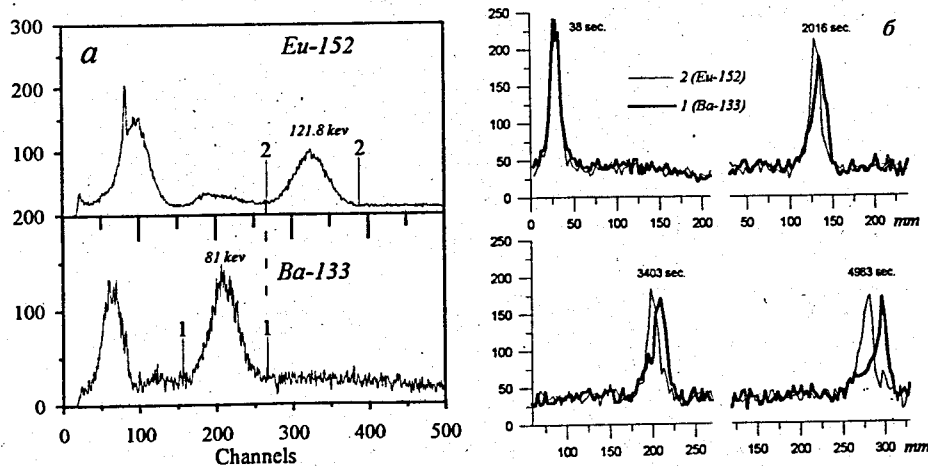


Рис.9. Расстановка энергетических окон в спектрах европия-152 и бария-133 (а) и полученные для этих окон гистограммы "координата (мм) - интенсивность излучения (отн.ед.)" при одновременной миграции этих изотопов (10 В/см, 0,005М раствор лимонной кислоты с рН=3,0)

в) *одновременная миграция нескольких химических элементов.* Установка энергетических окон в различные участки спектров исследуемых радиоактивных изотопов в ряде случаев делает возможным раздельное слежение за двумя одновременно мигрирующими химическими элементами при введении в ячейку их смеси. Это особенно важно при работе с элементами, подвижности которых в условиях данного эксперимента близки ($\Delta u \leq 10\%$). Спектрометрическое "разделение" близко расположенных зон двух независимо мигрирующих элементов дает точную информацию об их относительном поведении в условиях данного опыта. В качестве примера можно привести эксперимент по измерению абсолютных и относительных подвижностей бария и европия в растворе лимонной кислоты. В электромиграционную ячейку, заполненную фоновым электролитом, содержащим $5.2 \cdot 10^{-3} M$ лимонной кислоты при рН=3,0, были введены 2 мкл раствора, содержащего по 2 мкКи ^{133}Ba и ^{152}Eu . Эксперимент проводился при условиях, аналогичных описанным в разделе а); на рис. 9,а показаны отснятые отдельно γ -спектры этих радионуклидов и положения выставленных в них энергетических окон, предназначенных для слежения отдельно за миграцией каждого элемента. На рис.9,б представлены полученные в различные моменты времени распределения интенсивностей излучения для обоих окон по длине электромиграционной трубки. Постепенное разделение зон бария и европия позволяет определить абсолютные значения их подвижностей (они составили $\bar{u}_{Ba} = (5.36 \pm 0.15) \cdot 10^{-4}$ и $\bar{u}_{Eu} = (5.00 \pm 0.09) \cdot 10^{-4}$ см²/В·с) и рассчитать их относительную разность.

IV. Заключение

Описанная экспериментальная установка для горизонтального зонного электрофореза радионуклидов в свободных электролитах позволяет проводить как абсолютные, так и относительные измерения подвижностей следовых количеств элементов в растворах. Исследование зависимостей таких подвижностей от состава раствора (рН, ионная сила, концентрация комплексообразователя) дает ценную количественную и качественную информацию о протекании процессов гидролиза и комплексообразования. Эта задача представляет фундаментальный научный интерес и в настоящее время весьма актуальна [11], так как вплотную связана с проблемой неконтролируемой миграции в окружающей среде радионуклидов из накопителей и захоронений. В частности, предлагаемая нами методика исследований предоставляет практически уникальную возможность изучать гидролиз и комплексообразование плутония при его концентрациях в растворе $\leq 10^{-8} M$. Такие исследования становятся возможными при использовании единственного короткоживущего γ -излучающего изотопа ^{237}Pu ($T_{1/2} = 45.3$ дня). Особенно интересными являются процессы гидролиза и комплексообразования ультрамикрочастиц Pu(V), так как эта форма считается доминирующим состоянием плутония в разбавленных водных растворах [12, 13].

Выполнение настоящей работы стало возможным благодаря финансовой поддержке со стороны Российского фонда фундаментальных исследований (грант №94-03-08934) и Международного научного фонда (грант №NK-6000).

Литература.

1. M.Milanov, W.Doberenz, A.Marinov, V.A.Khalkin, *J. Radioanal. Nucl. Chem., Articles*, 82/1 (1984), p. 101.
2. M.Milanov, Tran Kim Hung, D.Shoninsky, F.Rosch, V.A.Khalkin, *Radiokhimija (Rus.)*, 29/5 (1987), p. 650.
3. F.Rosch, T.Reimann, G.V.Buklanov, M.Milanov, V.A.Khalkin, R.Dreyer, *J. Radioanal. Nucl. Chem., Articles*, 134/1 (1989), p. 109.
4. Tran Kim Hung, M.Milanov, F.Rosch, V.A.Khalkin, *Radiochim. Acta*, 47 (1989), p. 105.
5. F.Rosch, S.Dittrich, G.V.Buklanov, M.Milanov, V.A.Khalkin, R.Dreyer, *Radiochim. Acta*, 49(1990), p. 29.
6. M.Milanov, F.Rosch, V.A.Khalkin, Yu.Henniger, Tran Kim Hung, *Radiokhimija (Rus.)*, 29/1 (1987), p. 21.
7. F.Rosch, V.A.Khalkin, *Radiochim. Acta*, 51(1990), p. 101.
8. N.I.Zhitariuk, N.I.Shtanko, *Polymer*, 32(1991), p. 2406.
9. N.I.Zhitariuk, N.I.Shtanko, *European Polymer Journal*, 26(1990), p.847.
10. L.M.Faulkenberry, *An Introduction to Operational Amplifiers with Linear IC Applications*. John Wiley & Sons, New York, 1982.
11. I. Al Mahamid, K.A.Becraft, H.Nitsche, *Radiochim. Acta*, 68(1995), p. 63.
12. D.M.Nelson, M.B.Lovett, *Nature*, 276(1978), p. 599.
13. G.R.Choppin, *J. Radioanal. Nucl. Chem., Articles*, 147 (1991), p. 109.

Цупко-Ситников В.В. и др.

P12-95-527

Установка для горизонтального зонного электрофореза радионуклидов в свободных электролитах

Описаны устройство и принцип работы установки для измерения подвижностей ионов радионуклидов в растворах в электрических полях. Применение оригинальной конструкции электромиграционной ячейки и электронных систем стабилизации позволяет проводить измерения при строго стабилизированных составах и температурах фоновго раствора. Показана возможность наблюдения за одновременной миграцией нескольких радиоэлементов и определения их абсолютных и относительных подвижностей в условиях одного и того же эксперимента. Представлены иллюстрационные экспериментальные результаты.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1995

Перевод автора

Tsoupko-Sitnikov V. et al.

P12-95-527

Device for Horizontal Zone Electrophoresis of Radionuclides in Free Electrolytes

A design and operation of an experimental device for measuring radionuclide ion mobilities in solutions in electric fields are described. An originally designed electromigration cell and electronic stabilization systems provide strict stabilization of electrolyte composition and temperature during the measurements. Simultaneous migration of several radioelements can be observed and their absolute and relative mobilities under the same experimental conditions can be determined by this equipment. Some illustrations of the experimental results are presented in the paper.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1995