

## МЕТОД РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ В СИСТЕМЕ ВСТРЕЧНЫХ, АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

*Б.С. Акшианов, В.Ф. Зеленский, Н.А. Хижняк*

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
Украина, 61108, г. Харьков, Академическая, 1*

Обсуждается разделение изотопов в системе встречных, аксиально-симметричных магнитных полей. Проведены оценки стоимости работ по разделению изотопов в такой установке и показано, что она на порядок ниже, чем стоимость работ разделения другими известными методами. Эксперименты по разделению изотопов лития-6 и лития-7 подтверждают высокую эффективность метода. Приводятся оценки параметров установки по разделению урана-235 и урана-238. Высказывается мысль о практической целесообразности дополнительной, более глубокой переработке отвального урана (с содержанием урана-235 ~0,25% и ниже) для получения кондиционного реакторного уранового топлива.

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема разделения изотопов остается актуальной, особенно в атомной энергетике, где она является ключевой как на стадии подготовки ядерного топлива, так и в особенности на интенсивно разрабатываемой стадии переработки тепловыделяющих элементов после их извлечения из реактора, отработавшего плановый срок. Сегодня мировая атомная энергетика потребляет десятки тысяч тонн в год обогащенного урана, перерабатывая миллионы тонн урановой руды и затрачивая на это многие миллиарды долларов. Большие средства расходуются и на получение ряда изотопов, необходимых для промышленности, медицины и лабораторных исследований. Предложены и используются разнообразные устройства для разделения изотопов, однако стоимость этих процессов и сегодня непомерно высока. И эти процессы мало приспособлены технологически для решения второй кардинальной проблемы атомной энергетике - изотопной разгонки отработавших тепловыделяющих элементов. И до настоящего времени отсутствуют технологии глубокой переработки этих отходов, хотя они являются ценным сырьем для получения многих драгоценных и технически важных элементов и редких земель.

В настоящей работе излагаются результаты экспериментальной проверки нового и, как показывают расчеты, весьма перспективного метода разделения изотопов в системе аксиально-симметричных, встречных магнитных полей. Эксперименты по разделению изотопов проведены на природной смеси изотопов лития (92,48%  ${}^7\text{Li}$  и 7,52%  ${}^6\text{Li}$ ). Высокая эффективность разделения изотопов и его относительная дешевизна ставят на повестку дня обсуждение технической возможности глубокой повторной переработки отвального урана, все еще содержащего значительные количества  ${}^{235}\text{U}$  (99,74%  ${}^{238}\text{U}$  и 0,26%  ${}^{235}\text{U}$ ) и хранящегося, как правило, в виде соединений  $\text{UF}_6$ . Проводится сопоставление рассматриваемого метода разделения изотопов с традиционно применяемыми в атомной энергетике. По-видимому, этот метод открывает пути глубокой переработки отрабо-

тавших тепловыделяющих элементов.

### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАЗМЕННОГО МЕТОДА РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ В СИСТЕМЕ ВСТРЕЧНЫХ, АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Теоретические основы метода изложены в работе [1], где описаны результаты численного исследования траекторий заряженных частиц, инжектируемых в магнитную ловушку остроугольной геометрии (рис. 1) из источника А, расположенного в левой пробке ловушки на расстоянии  $r_0$  от магнитной оси  $OZ$  (оси симметрии ловушки). Частицы инжектируются вдоль оси  $OZ$  со скоростью  $v_0$ .

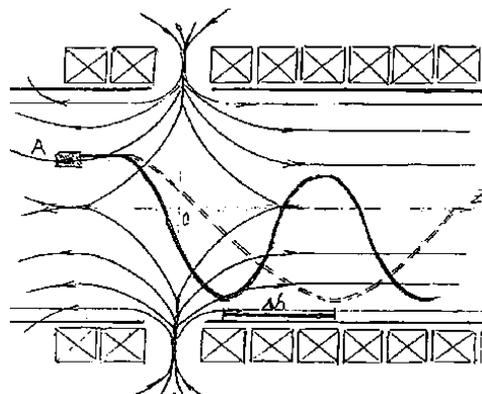


Рис. 1 Схема установки, созданной в ННЦ ХФТИ для разделения изотопов во встречных, аксиально-симметричных магнитных полях

Будем полагать, что напряженность магнитного поля на оси пробки равна  $H_0$ . Тогда траектории частиц, движущихся к области нулевого магнитного поля, будут существенно определяться параметром  $\eta$ , равным

$$\eta = \frac{eH_0r_0}{Mv_0c}$$

Здесь  $M$  - масса;  $e$  - заряд частицы;  $c$  - скорость

света. Частицы, инжектируемые параллельно оси системы, при

$$\eta < 0,7 \div 0,75$$

проходят область нулевого магнитного поля, переходят в правую пробку ловушки, вращаясь вокруг оси системы и образуя спираль с относительно малым шагом. Ось спирали смещена относительно геометрической оси системы, и это смещение возрастает с уменьшением расстояния источника от оси при неизменной скорости инжекции частиц. Величина смещения оси вращения от геометрической оси системы возрастает, если частица инжектируется не параллельно оси системы.

Скорость поступательного движения этих частиц в правой пробке равна

$$v = v_0 \sqrt{1 - \eta^2},$$

а шаг спирали  $h$

$$h = 2\pi r_0 \frac{\sqrt{1 - \eta^2}}{\eta}.$$

Следовательно, если из источника А при одном и том же  $r_0$  инжектируются в ловушку ионы, с одной и той же скоростью  $v_0$  но с разными массами, то в правой пробке эти ионы будут двигаться по спиралям с разным шагом, что в конечном итоге приводит к пространственному разделению частиц разных масс. Возле граничного значения  $\eta \approx 0,7 \div 0,75$  это разделение может быть заметным, хотя массы частиц могут быть близки. Это обусловлено тем, что проходя область нулевого магнитного поля частицы как бы забывают свои начальные параметры движения и это является тем принципиально важным обстоятельством, которое отличает разделение частиц в рассматриваемой системе магнитных полей от обычно используемых магнитных полей в магнитных сепараторах.

При

$$0,7 \div 0,75 < \eta < 1,0$$

частицы, инжектируемые параллельно оси системы, отражаются от противоположной пробки, хотя частицы, инжектируемые под некоторым углом к оси, могут проходить через ловушку, если они достигают противоположную пробку с радиусом, близким к радиусу инжекции. Частицы, отраженные от противоположной пробки, могут проводить в ловушке некоторое время, находясь главным образом в ее пробках. Это время составляет при  $\eta \sim 1$  порядка 10 времен свободного пролета частицы через ловушку.

При

$$\eta \approx 1,0$$

наблюдается относительное "удержание" частиц в ловушке. Последняя может совершить несколько отражений от магнитных стенок ловушки и покидает ее преимущественно через кольцевую щель. Число отражений от магнитных стенок существенно зависит от величины магнитного поля и, в

конечном итоге, от параметра  $\eta$ . При  $\eta \sim 1$  частица испытывает всего несколько (5...8) отражений от магнитных стенок, а при  $\eta \sim 0,8$  число отражений достигает нескольких десятков (более 20).

При  $\eta > 1$  частицы покидают ловушку через кольцевую щель.

Теоретические результаты работы [1] были подтверждены экспериментально [2-4] и это послужило основанием для ряда дальнейших исследований.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для экспериментального изучения сепарирующих свойств системы встречных, аксиально-симметричных магнитных полей была создана относительно простая экспериментальная установка, схема которой представлена на рис.1, а общий вид - на рис.2. Рабочая камера диаметром 300 мм и длиной 1000 мм изготовлена из нержавеющей стали.

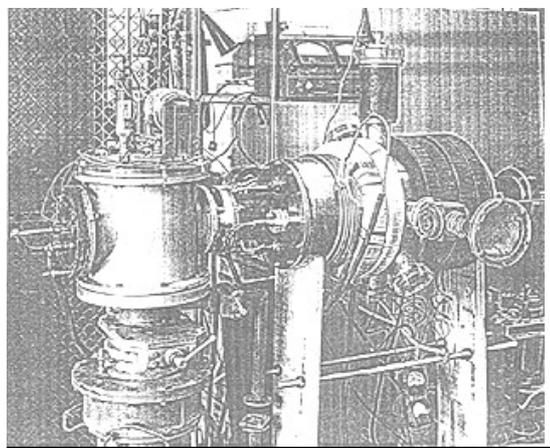


Рис.2. Общий вид экспериментальной установки, созданной и исследованной в НИЦ ХФТИ

С одного конца камеры через патрубок  $\varnothing 20$  мм производится ее откачка вакуумным насосом, производительностью 500 л/с. Этим насосом обеспечивался предельный вакуум в камере  $P_a(3.10^{-6}$  мм рт.ст.) и рабочий вакуум  $P_a(\sim 3.10^{-5}$  мм рт.ст.) В этом же торце камеры имеется отверстие с уплотнением для ввода ионного источника, расположенного на среднем радиусе  $r_0=110$  мм. Симметрично с ним, ( $\varphi = 180^\circ$ ) на том же радиусе, расположена зондирующая точечная электронная пушка. Сильноточные и высоковольтные вводы размещаются на этом же конце камеры - два на самом торце камеры, а остальные на фланце за переходной камерой насоса М500. Камера оборудована шестью патрубками, расположенными посередине и разнесенными по образующей цилиндра.

С другого торца камеры расположен патрубок  $\varnothing 20$  мм с заглушкой из оргстекла, через которую вводятся электроды для отбора изотопов. На этом же торце камеры на радиусах 110 мм расположены:

а) смотровое окно для визуального контроля правильности установки ионного источника;

б) зонд с флюоресцирующим экраном для контроля положения электронного пучка.

В одном из боковых патрубков, расположенных в центральной плоскости системы, помещен флюоресцирующий экран для контроля величины магнитного поля с помощью отклоненного электронного пучка.

Встречное магнитное поле, переходящее в однородное, создается шестью соленоидами, одетыми на камеру. В районе ионного источника имеются два соленоида, формирующих левую магнитную пробку ловушки, а за нейтральной плоскостью - четыре. Эти две группы соленоидов включены так, что формируются встречные магнитные поля. В результате формируется система аксиально-симметричных магнитных полей с остроугольной геометрией магнитных силовых линий в районе кольцевой щели и нулевым магнитным полем у оси системы (в районе патрубков).

Эксперименты по разделению изотопов проводились с природными образцами лития.

В ионном литиевом источнике с поверхностной ионизацией, для достижения высокой эмиссии положительных ионов щелочного металла Li необходима высокая температура. В то же время потенциал ионизации атомов лития сравнительно невысок (5,39 эВ). Поэтому, исходя из условий работы и конструктивных соображений, ионный источник выполнен в виде трубки из нержавеющей стали  $\varnothing 6$  мм, вводимой через уплотнение в камеру. В качестве испарителя использовался участок трубки длиной 70 мм, проточенный до толщины стенки 0,1 мм. Этот участок заполнялся металлическим литием, вводимым через торец трубки, расположенной снаружи камеры. Конец проточенной части трубки, обращенный внутрь камеры, закрывался сеткой из нержавеющей стали. Далее, после сетки в трубку через боковой изолятор вводилась двойная вольфрамовая нить, служащая нагревателем и ионизатором лития. Затем помещалась вторая сетка, поддерживаемая при потенциале 1 В по отношению к нити. После этого располагались: вытягивающий электрод, имеющий потенциал 1 кВ и система задерживающих электродов, снижающих энергию ионов до 10 эВ. Последний электрод находился под потенциалом земли. Для уменьшения теплопередачи от нагреваемой части источника к вакуумному уплотнению оно отделено от нагреваемой части и потенциала специальным керамическим изолятором и нейзильберовой трубкой  $\varnothing 16$  мм. В торец нейзильберовой трубки, выступающей из камеры наружу, через резиновую пробку введен шток (охлаждаемый водой) с поршнем для проталкивания в камеру испарителя кусочков металлического лития, вводимого в источник. Камера в районе источника охлаждалась водой. Источник, заполненный рабочим веществом, работал следующим образом: после откачки камеры с источником до давления  $3 \cdot 10^{-6}$  мм рт.ст. постепенно нагревался проточенный участок трубки испарителя путем пропускания через него тока порядка 108 А при  $V = 1,5$  В. При этом нагреваемый участок при-

обретал темно-красное (вишневое) каление, что соответствовало нагреву примерно до  $700^{\circ}\text{C}$ . При увеличении тока до  $\sim 120$  А нагреваемый участок светился ярко-красным светом, т.е. его температура достигала  $900^{\circ}\text{C}$ .

Далее пары лития поступали в ионизатор, где на вольфрамовой спирали, нагретой до  $\sim 1200^{\circ}\text{C}$ , ионизировались и в виде положительных ионов вытягивались из источника.

При сечении пучка  $4 \times 12$  мм<sup>2</sup> предельный ток ионов лития составлял  $\sim 10$  мА, однако рабочий ток поддерживался на уровне 1 мА. Расход рабочего вещества составлял 0,3 г/ч. Одной заправки источника хватало на работу в течение 2 ч. Коэффициент испарения рабочего вещества составлял  $\sim 25\%$ .

В литературе [5] описаны и другие более эффективные источники ионов различных элементов, в том числе и источники ионов лития, дающие токи порядка десятков миллиампер. Они применялись на мощной промышленной установке для электромагнитного разделения изотопов. Такая установка, созданная еще на ранней стадии исследований по ядерной проблеме, представляла собой сооружение, состоящее из электромагнита со средним радиусом траектории ионов лития 900 мм, дисперсией на уровне 0,01 ( $\Delta M/M$ ) равной 9 мм, весом магнита 220 т и потребляемой электроэнергии 45 кВт. Установка откачивалась вакуумным насосом производительностью 20000 л/с. В дальнейшем такие установки совершенствовались в деталях, но общий вид и их масштабы оставались неизменными.

Интересно сопоставить такие установки с вновь предлагаемыми, чтобы оценить возможности их практической реализации.

## ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приемный электрод из нержавеющей стали толщиной 0,2 мм и размером  $40 \times 50$  мм размещался в направлении правой пробки за плоскостью нулевого магнитного поля на расстоянии  $\sim 20$  мм от нее и на радиусе, равном 110 мм - радиусу размещения ионного источника в левой пробке. Этот электрод заземлялся через микроамперметр. Согласно расчетам, на этот электрод должны высаживаться ионы  ${}^6\text{Li}$ . Чтобы обеспечить точные расчетные значения магнитного поля на выходе пучка из источника, расчетную энергию пучка, симметрию встречного магнитного поля, расчетное расположение ионного источника, были предусмотрены ряд регулирующих и контрольных устройств. Значение магнитного поля на данном радиусе аксиально-симметричного поля контролировалось отклонением электронного пучка, фиксируемом на флюоресцирующем экране. Сама точечная электронная пушка располагалась симметрично ионному источнику на противоположной стороне от источника, на том же радиусе (сдвинутая по  $\varphi$  на  $180^{\circ}$ ). Для наблюдения за центровкой служило

окно, расположенное в противоположном торце камеры прямо противоположно источнику. Заданная энергия пучка ионов обеспечивалась питанием его электродов от стабилизированного источника питания. Чтобы исключить другие случайные конструктивные факторы, замеры выхода изотопов на приемный электрод производились при трех значениях магнитного поля 98, 100 и 102 Гс соответственно (среднее расчетное поле равно 100 Гс). Образцы, полученные на приемном электроде, именовались как 1, 2, 3.

Кроме указанного приемного электрода использовался также и трубчатый приемный электрод (нержавеющая сталь, толщина стенок 0,2 мм, диаметр трубки 24 мм и длина 40 мм), который размещался так же, как и предыдущий приемный электрод на расстоянии одного шага траектории изотопа  ${}^6\text{Li}$ . Образцы, снятые с этого приемного электрода, именовались как 1', 2' и 3' в соответствии со значением выбранного магнитного поля.

Анализ относительного содержания ионов в образцах проводился масс-спектрометрическим методом. В качестве контрольного был применен метод термоионной эмиссии.

Таким образом, на описанной выше экспериментальной установке было получено 6 образцов. Результаты анализа этих образцов представлены на кривых рис.3. Из приведенных анализов образцов видно, что содержание изотопа  ${}^6\text{Li}$ , попадающего на коллектор (100% — процентное содержание  ${}^7\text{Li}$ ), в значительной степени зависит от настройки магнитной системы и изменяется в среднем от 20 до 80% (для данного диапазона изменения магнитных полей). Следовательно, эксперимент полностью подтвердил высокую разделяющую способность сепаратора изотопов в системе встречных, аксиально-симметричных магнитных полей. К достоинствам предложенного метода следует отнести и простоту расчета траекторий частиц и простоту построения заданной конфигурации магнитных полей, а также возможность изменять производительность самой установки. Основным же достоинством метода является непревзойденная, исключительно высокая разделяющая способность устройства.

### О ВОЗМОЖНОСТИ ПОВТОРНОЙ, БОЛЕЕ ГЛУБОКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТВАЛЬНОГО УРАНА

Способ разделения изотопов, обсуждаемый в настоящей работе, ставит на повестку дня целесообразность организации работ по повторной, более глубокой переработке отвального урана, содержащего  $\sim 99,74\% {}^{238}\text{U}$  и  $0,26\% {}^{235}\text{U}$ . Для этого рассмотрим масштабы установки, обеспечивающей заметную производительность переработки отвального урана и сопоставим стоимость соответствующего производства на основе известных и предполагаемых технологий. К промышленным способам разделения урана относятся газодиффузионный, а также центрифужный (центробежный) методы. Разрабатывается

метод разделительного сопла. К лабораторным методам разделения изотопов относится масс-спектрографический метод, метод дорогой и малоэффективный.

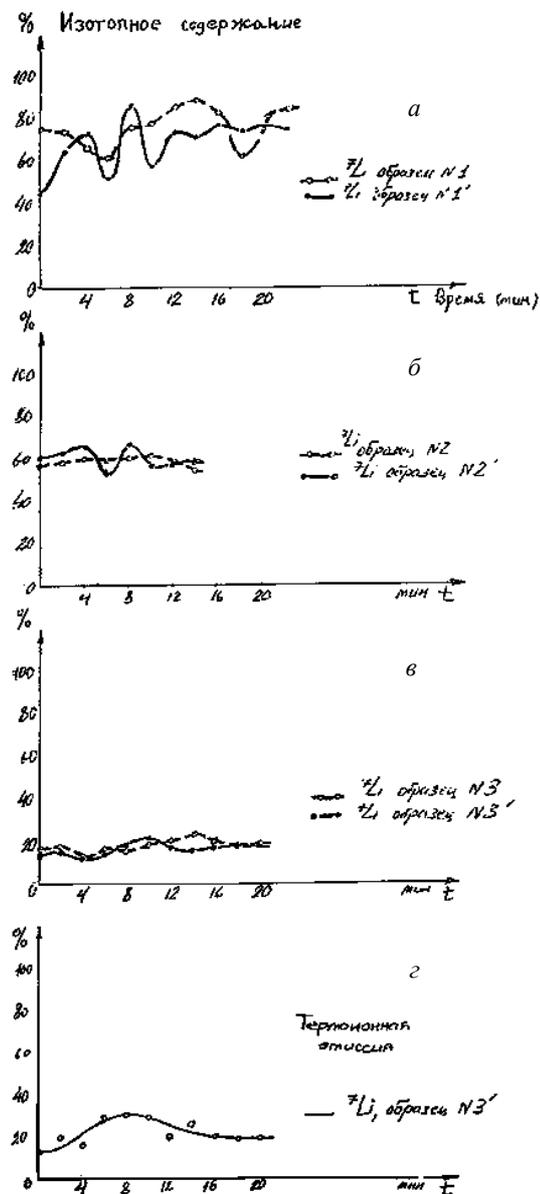


Рис. 3. Изотопное содержание образцов лития, (изм.  $\% {}^7\text{Li}$ ), полученных экспериментально на установке ННЦ ХФТИ в зависимости от экспозиции: а) - при  $B = 98$  Гс; б) - при  $B = 100$  Гс; в) - при  $B = 102$  Гс; з) - образец на масс-спектрометре (контрольное измерение)

Разрабатываются методы разделения изотопов во вращающейся плазме [6], лазерные методы [7], разделение изотопов в плазме в магнитном поле и с использованием ионно-циклотронного резонанса [8] и др. Цель разрабатываемых методов состоит в том, чтобы снизить стоимость процесса обогащения продукта заданными изотопами. Однако до настоящего времени ни один из лабораторных методов не доведен до промышленного использования.

В таблице приведены основные технические параметры, характеризующие возможности основных промышленных и разрабатываемых методов в

проблеме вторичной переработки отвалного урана. Кроме того, на основании результатов проведенных исследований высказывается предложение использовать для вторичной обработки отвалного урана и метод разделения изотопов во встречных, аксиально-симметричных магнитных полях. Действительно, предположим, что источник А (см. рис.1) инжектирует однозарядные ионы урана  $^{238}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$ , получаемые из газообразного исходного продукта  $\text{UF}_6$  путем его разложения и последующей ионизации атомов урана.

Пусть энергия изотопов урана, извлекаемых из источника, равна 1 кВ. Величина магнитного поля в точке инжекции на радиусе инжекции 12,5 см составляет 4 кГс. Тогда скорости ионов

$$v_{238} \cong 2,835 \cdot 10^6 \text{ см/с};$$

$$v_{235} \cong 2,854 \cdot 10^6 \text{ см/с};$$

$$\text{и значит, } R_{\text{л}} = \frac{m v c}{e B} = 17,36 \text{ см для } ^{238}\text{U} \text{ и } 16,98$$

для  $^{235}\text{U}$ . После прохождения области нулевого магнитного поля каждый ион будет двигаться по спирали, и шаг спирали  $h$  для каждого из этих ионов будет свой. Так

$$h_{238} = 2\pi \cdot 12,03 \text{ см}, \quad h_{235} = 2\pi \cdot 11,55 \text{ см},$$

и уже за один оборот в правой пробке траектории разойдутся в пространстве на расстояние  $\Delta h \sim 3,0$  см. На длине камеры в 350 см частицы совершают 5 оборотов, и пространственное разделение изотопов достигает величины  $\sim 15,0$  см. Таким образом, на относительно простой и дешевой установке может быть получен технически приемлемый эффект разделения изотопов. Следует подчеркнуть, что располагая приемные устройства в определенных местах по длине установки, можно получать не только уран-235 высокой степени очистки, но и смесь изотопов с заданным коэффициентом обогащения по урану -235.

### Сравнение эффективности обогащения отвалного урана в процессе вторичной переработки известными и предлагаемым способами

Параметры	Методы				
	Газодиффузионный	Центрифужный	Метод ионно-циклотр. резонанса	Предлагаемый метод C= 0,711 C=0,26 y = 0,1 y ~ 0	
1. Коэффициент разделения	1,0018	1,2...1,35	10,5	30...40	30...40
2. Число разделительных ступеней для получения x = 3% если C = 0,711%, y = 0,2%	1400	10-15	3-4	1-2	1-2
3. Период установления равновесия в сутках для варианта 2	25	0,1	0,05	0,04	0,04
4. Удельные капвложения дол/ЕРР/год	300...400	260...450	160	-	-
5. Удельный расход электроэнергии, кВтч/ЕРР	2400...2500	$\leq 100...250$	380...400	18	$\sim 60$
6. Экономический период амортизации, лет	20...25	10...15	10	-	-
7. Стоимость в долларах 1ЕРР (по данным 1975 г.)	79	70	20,3	2	6
8. Стоимость завода производительностью $\sim 2 \cdot 10^6$ ЕРР/год(млрд.дол)	4,2...4,5	2,0...3,0	0,5	0,05	0,05

Обозначения: x - процентное содержание  $^{235}\text{U}$  после обогащения; C - процентное содержание  $^{235}\text{U}$  в исходном материале; y - процентное содержание  $^{235}\text{U}$  во вновь возникшем отвале.

### ВЫВОДЫ

1. Эксперименты на литиевых пучках подтверждают высокую эффективность магнитной системы, состоящей из двух соосных соленоидов с противоположно включенными токами, как устройства, разделяющего ионные пучки по массам.

2. Простые расчеты показывают, что на относительно простых и доступных установках может быть достигнут технически приемлемый эффект разделения изотопов урана, содержащего следы урана-235, что ставит на повестку дня проблему повторной, более глубокой переработки отвалного урана и получения из этих отходов ядерного топлива требуемой кондиции. Кроме того, можно ожидать, что в стоимостном выражении это на два порядка дешевле, чем на газодиффузионных заводах.

3. Основная техническая проблема состоит не в

создании самой магнитной системы, а в разработке и создании эффективного и надежного источника ионов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. К.Д. Синельников, Н.А. Хижняк, Н.С. Репалов и др., Исследование движения заряженных частиц в магнитных ловушках остроугольной геометрии // Физика плазмы и проблемы УТР. Киев: «Наукова Думка», 1965, вып.4, с.388-402.
2. К.Д. Синельников, Б.С. Акшанов, Экспериментальное исследование движения заряженных частиц в магнитных ловушках остроугольной геометрии // Физика плазмы и проблемы УТР. Киев. «Наукова Думка», 1965, вып.4, с.403-410.
3. Б.С. Акшанов, В.Г. Маринин, А.И. Стрельцов, К.Д. Синельников, К вопросу инжекции заряженных частиц в ловушку зеркального типа // ЖТФ. 1965, т.35, с.2232-2234.
4. Б.С. Акшанов, Н.А. Хижняк, Новый эффективный метод разделения изотопов // Письма в ЖТФ. 1991, т.17, вып.6, с.13-16.
5. П.М. Морозов, Б.Н. Маков, М.С. Иоффе, Б.Г. Брежнев, Т.М. Фрадкин, Ионный источник для разделения стабильных изотопов // Труды 2 Международной Конференции по мирному использованию атомной энергии, Женева, 1985, Изд-во Иностр. Лит., М.: 1959, с.111-116.
6. В. Bonnevier, // Plasma Physics, 1971, v. 13, <sup>1</sup> 9, p.763-774.
7. В. Летохов, Б. Мур, // Квантовая электроника. 1976, т.3, <sup>1</sup>2(44), <sup>1</sup>3(45).
8. J.M. Dawson, H.C. Kim, D. Aznush, et.al. Isotope Separation in Plasmas by Use of Ion Cyclotron Resonance, // Phys. Rev. Lett. 1976, v. 37, <sup>1</sup>23.