



РОСАТОМ



РАН



ОИВТ РАН



МИФИ



НИИЭФА



НИКИЭТ



НИИАР

## К возможности переработки ОЯТ методами плазменной сепарации

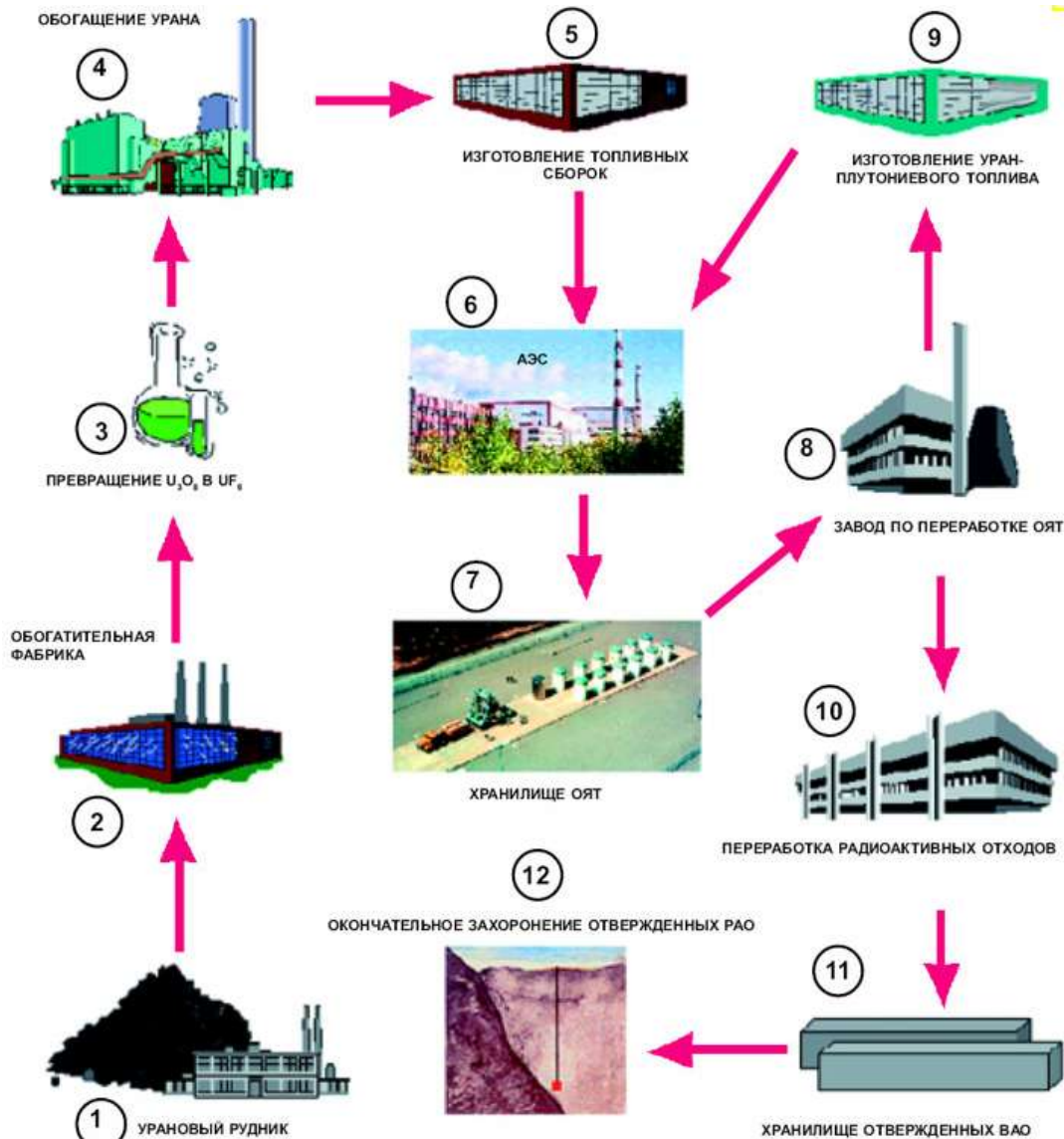
---

Докладчик: Гавриков А. В.

- Актуальность создания и потенциальные возможности плазменной технологии переработки ОЯТ.
- Некоторые результаты зарубежных работ по созданию плазменной технологии переработки радиоактивных отходов.
- Некоторые результаты работ, поддержанных Госкорпорацией «Росатом»



# Замкнутый топливный цикл в атомной энергетике



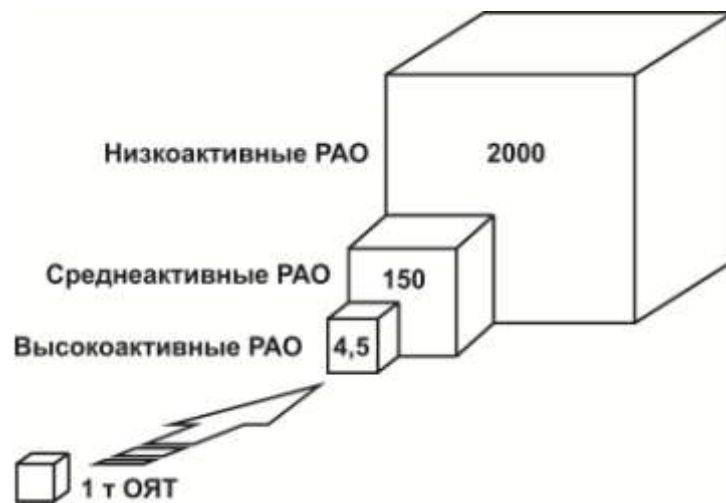
«6° 7° 8° 9° 6» — ЗАМКНУТЫЙ ЯДЕРНЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ  
«5° 6° 7» — ОТКРЫТЫЙ ЯДЕРНЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ

### Плазменная сепарация

- «Сухая» регенерация РАО и ОЯТ, кондиционирование радиоактивных отходов в безводной форме, пригодной для длительного хранения или последующего захоронения
- Малое количество дополнительных (новых) отходов
- Технология «универсальна» - практически не зависит от материала
- Встраивается в существующие и проектируемые циклы переработки материалов с изменением масштаба переработки в широких пределах

### Химическая переработка

- Образование большого количества жидких радиоактивных отходов
- Возможность неконтролируемого распространения плутония и других делящихся компонентов ядерного оружия



Увеличение объема РАО в ходе переработки ОЯТ на радиохимических заводах (в м³)



## Некоторые требования к переработке ОЯТ быстрых реакторов

---

- Уран и плутоний не должны разделяться на всех стадиях. Атомарное содержание плутония в процессе менее 25%
- Остаток продуктов деления в регенерированном топливе – 0,1-10% масс каждого из элементов
- В захороняемых отходах не более 0,1% урана, плутония и минорных актинидов
- Отходы должны выдерживаться до захоронения около 200 лет
- Предпочтительна пристанционная переработка ОЯТ, чтобы избежать перевозки больших масс высокоактивных веществ
- Для обеспечения стационарного режима скорость наработки ОЯТ должна равняться скорости его переработки. БР реактор 1 ГВт эл производит 5-10 тонн ОЯТ в год. Требуемая производительность переработки порядка 0,5 г/с



### Требуемый ток ионов

$$I \approx e \frac{P}{E_0} \frac{1}{k_1 k_2}$$

### Отношение мощности сепарации к электрической мощности реактора

$$\eta_s = \frac{E_i}{E_0 k_1 k_2 \eta_e \eta_p}$$

$P$  – тепловая мощность  
реактора  
 $E_0$  – энергия акта деления  
 $E_i$  – энергия акта  
образования иона  
 $k_1$  – коэффициент  
выгорания  
 $k_2$  – относительное  
содержание атомов U в  
топливе  
 $\eta_e$  – КПД реактора  
 $\eta_p$  – КПД сепаратора

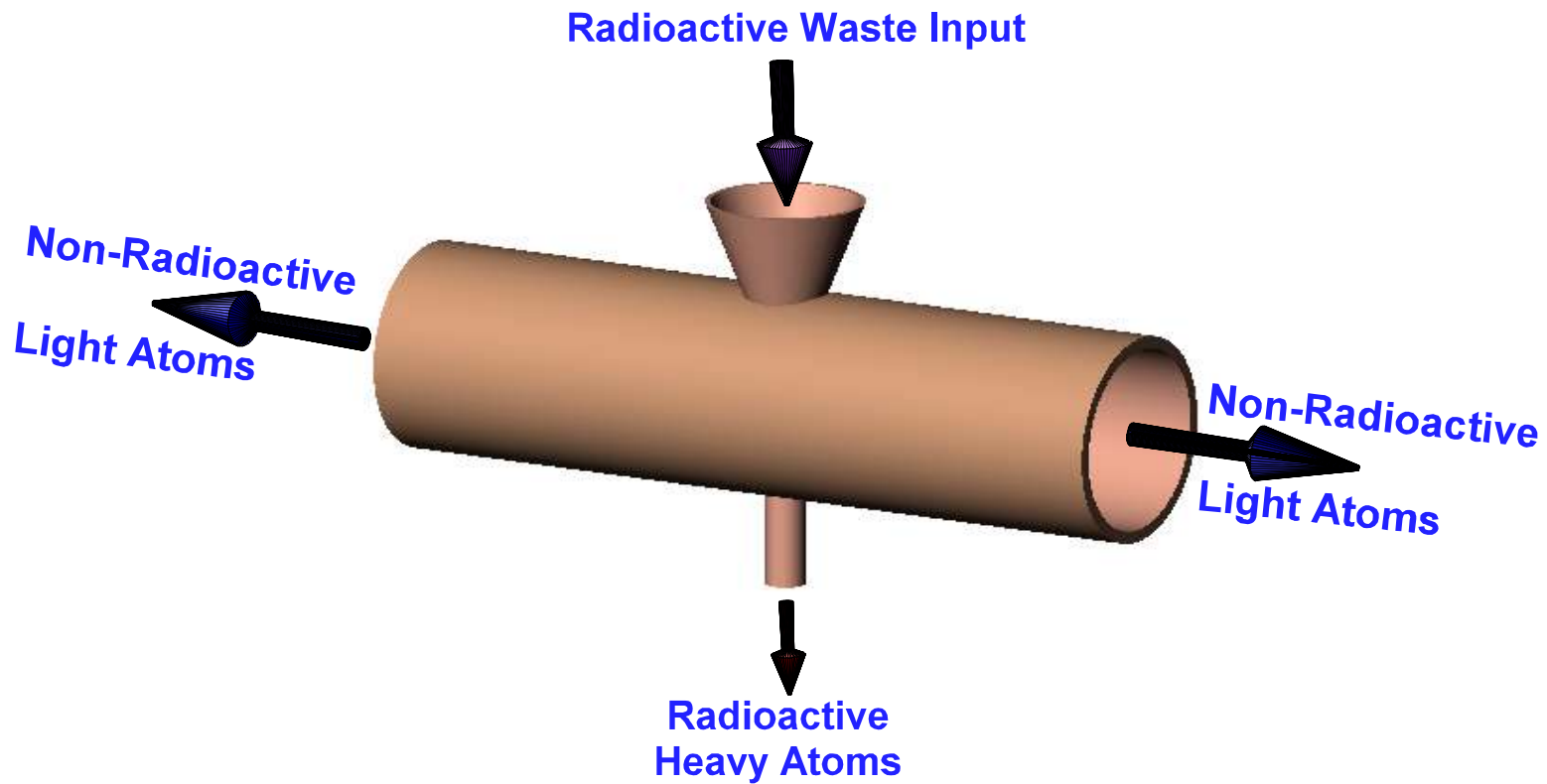
**Пример:**  $P = 1$  ГВт;  $k_1 = 5 \cdot 10^{-2}$ ;  $k_2 = 1/3$ ;  $\eta_e = 1/3$ ;  $\eta_p = 0,5$ ;  $E_i = 1$  кэВ

$$I \approx 200 \text{ А} , \eta_s = 0,2 \%$$



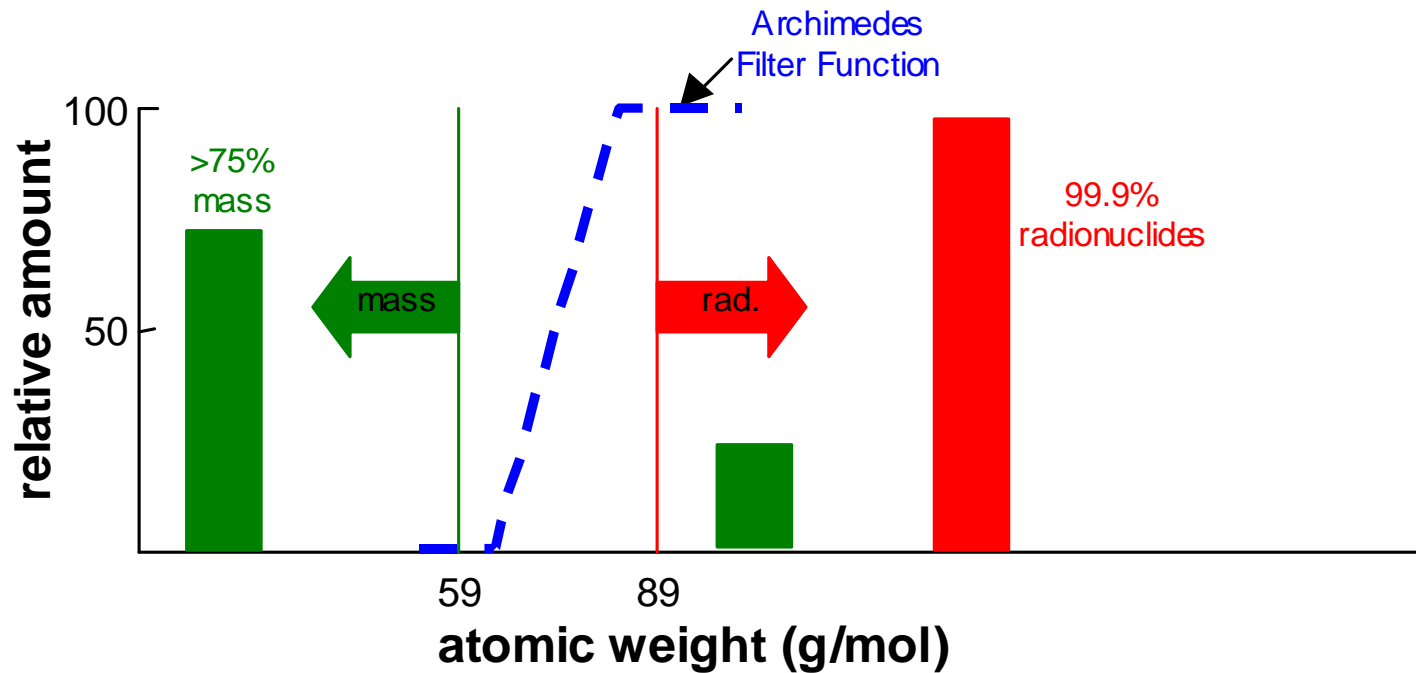
# Archimedes – принцип работы

---





# ARCHIMEDES SEPARATIONS POTENTIAL FOR HANFORD HLW BLEBD

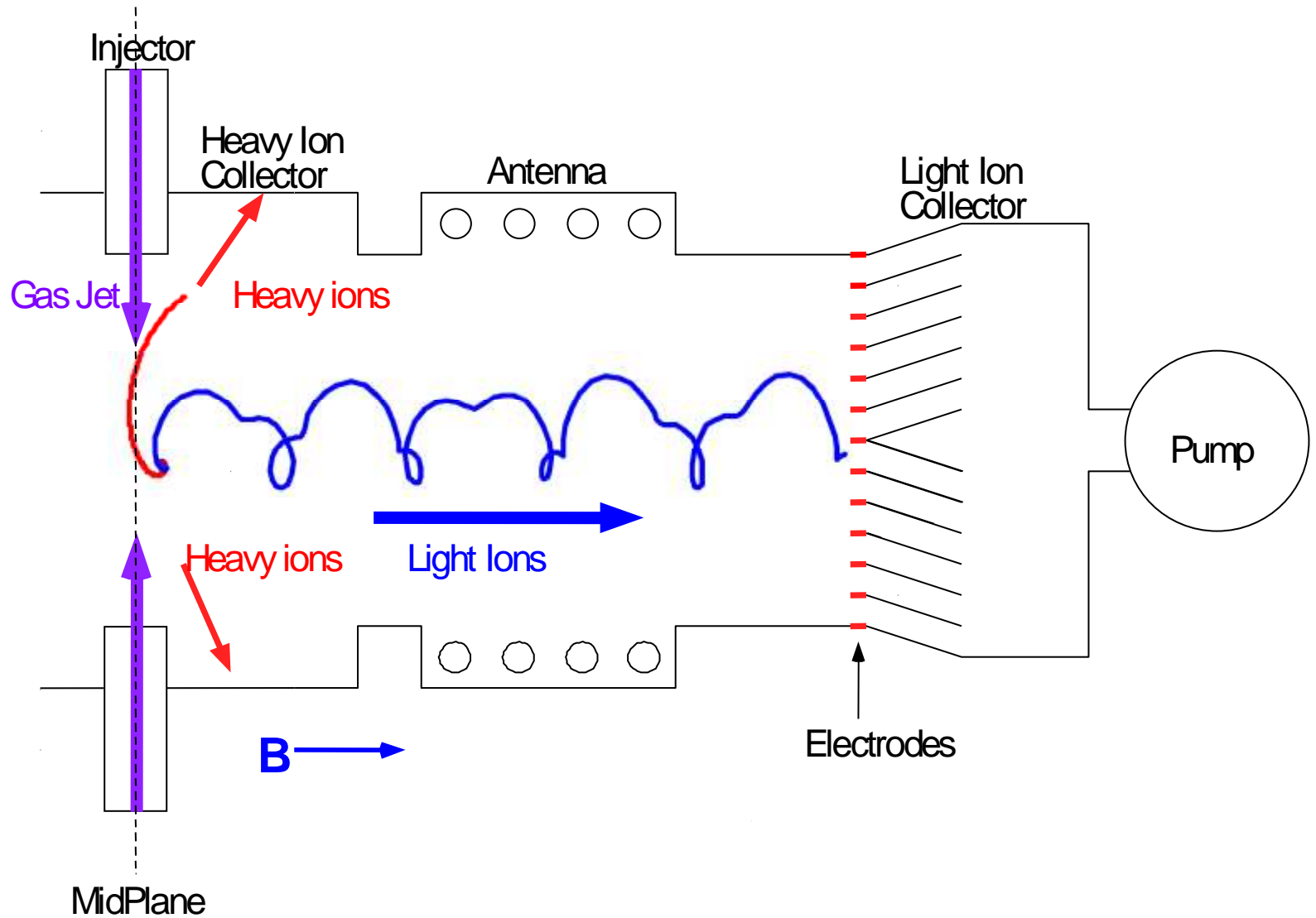


Разделение радиоактивных элементов и элементов с массами менее 89.



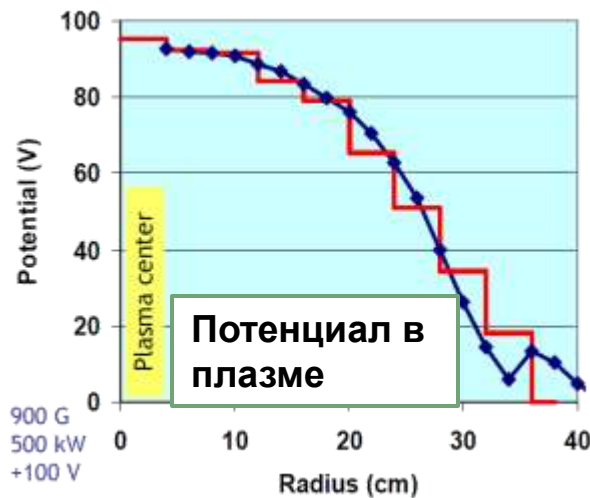
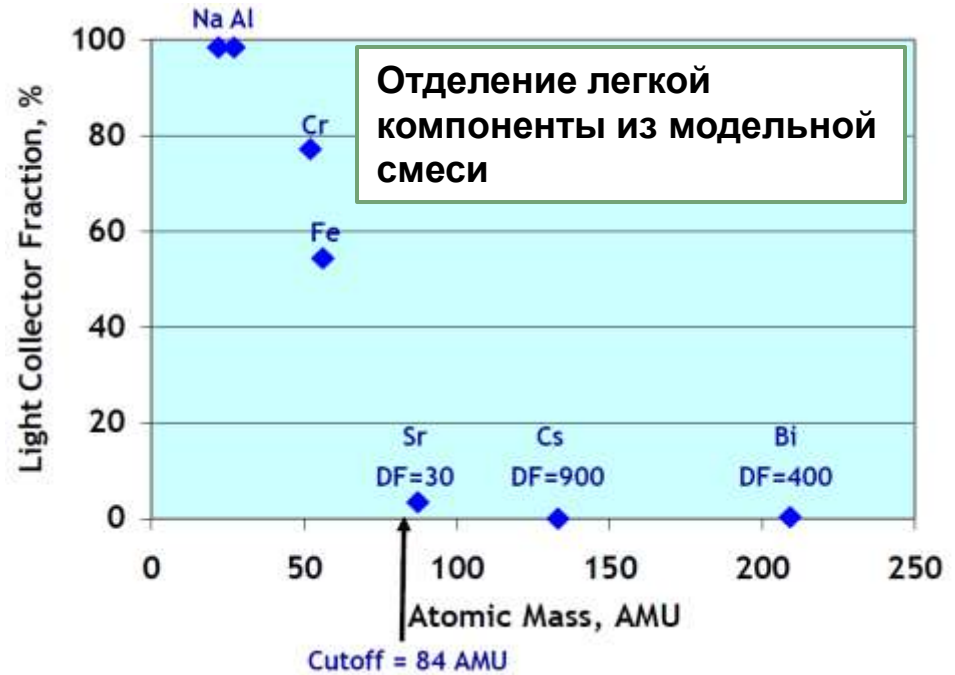
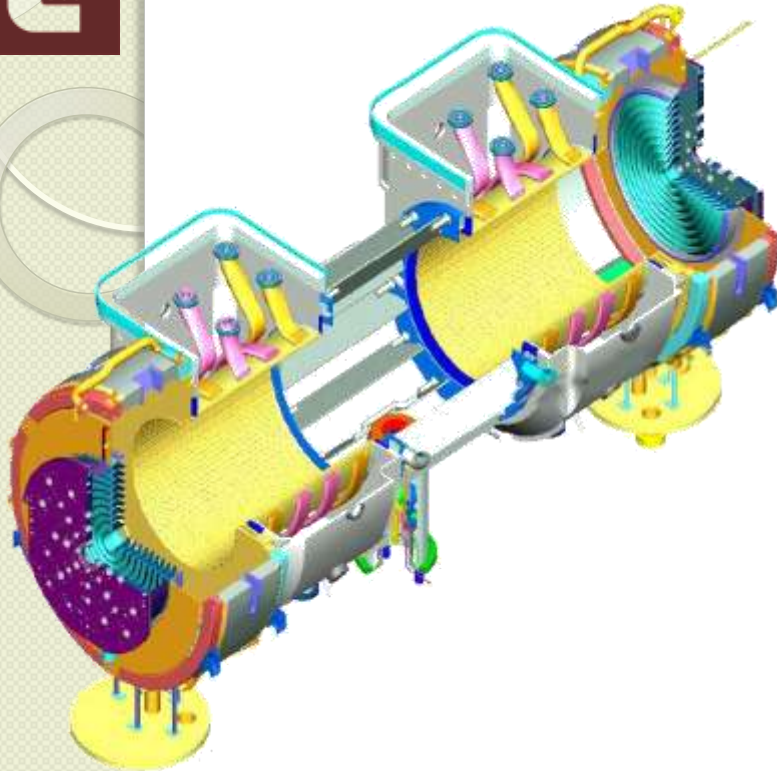


# Archimedes – Демонстрационная установка фильтрации РАО по массам





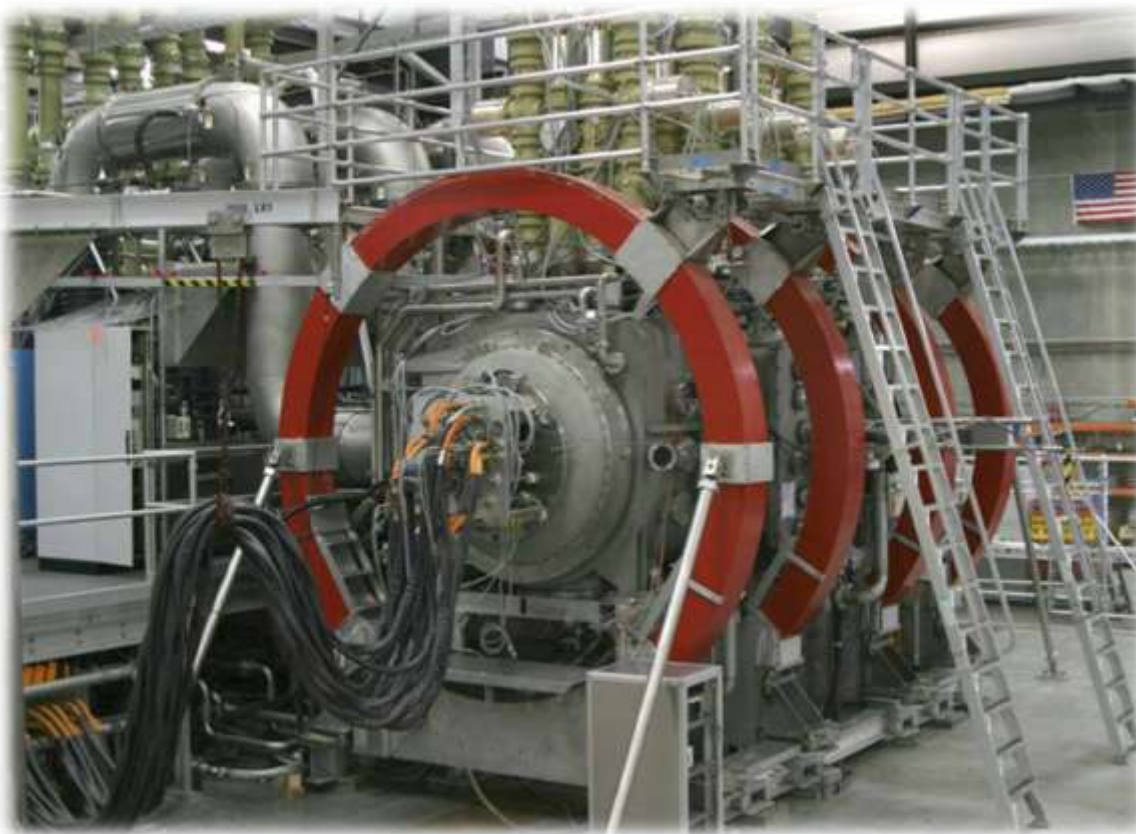
# Archimedes – Демонстрационная установка фильтрации РАО по массам



- Реализованы потенциалы в плазме
- Однократная высокая ионизация в широком диапазоне температур
- Хорошая степень разделения
- Высокая эффективность переработки материала



## Archimedes – Демонстрационная установка фильтрации РАО по массам



### Параметры производственной установки

$$R_k = 0,4 \text{ м}$$

$$P_{\text{ст}} = 2 \text{ МВт/м}^2$$

$$(A/z)_{\text{кр}} = 84$$

$$B = 0,17 \text{ Тл}$$

$$N = 3,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$$

$$P_{\text{вч}} = 5,9 \text{ МВт}$$

$$M_{\text{РАО}} = 1100 \text{ кг/сут}$$

### Достигнутые результаты

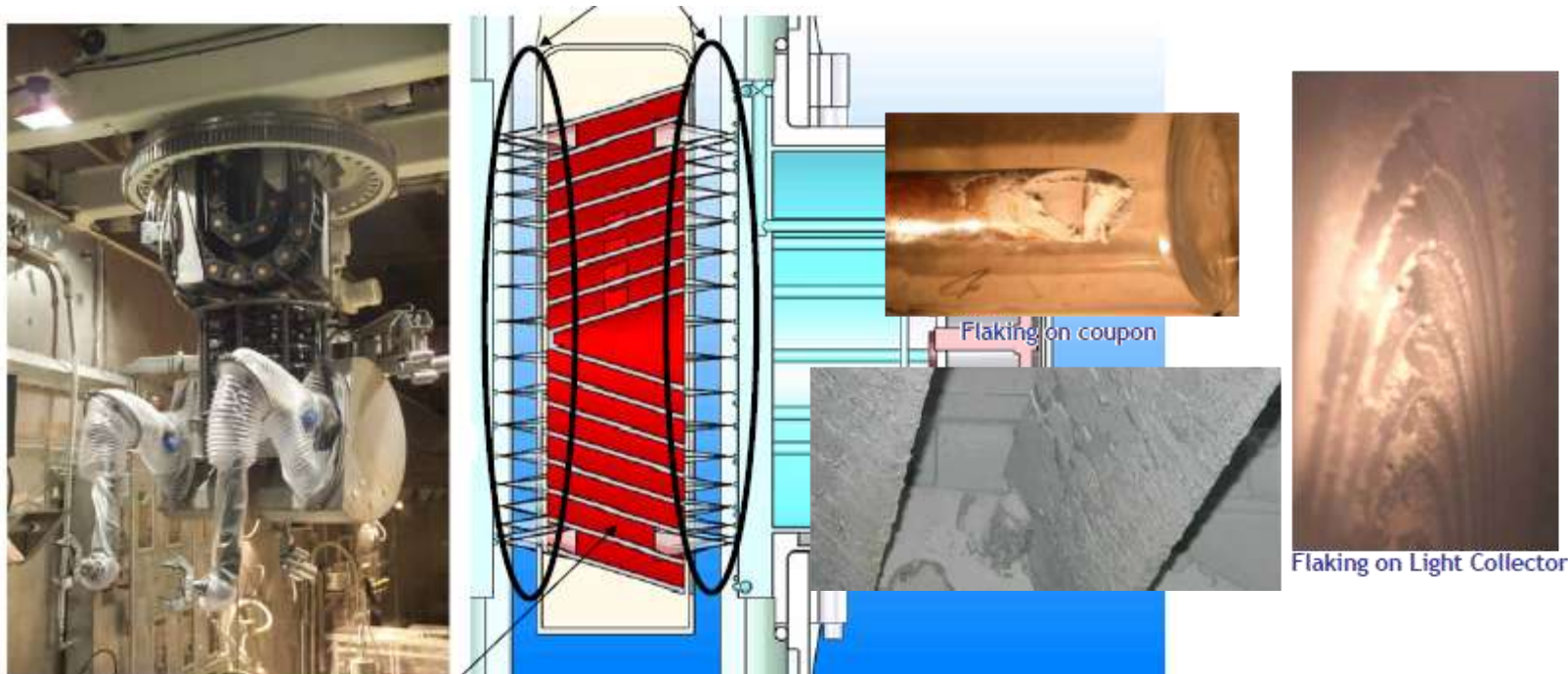
$$M_{\text{РАО}} = 440 \text{ кг/сут}$$

$$E_i = 300 \text{ eV}$$

$$T_e = 1,2 - 1,8 \text{ eV}, Z = 1$$

частные инвестиции - 79 млн. \$  
ожидаемая прибыль > 1000 млн. \$

- A. Litvak, S. Agnew, F. Andereg et al., Archimedes Plasma Mass Filter, 30th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys., St. Petersburg, 7-11 July 2003 ECA Vol. 27A, O-1.6A
- R. Freeman, S. Agnew, F. Andereg et al., 2003, Radio Frequency Power in Plasmas, 694, 403

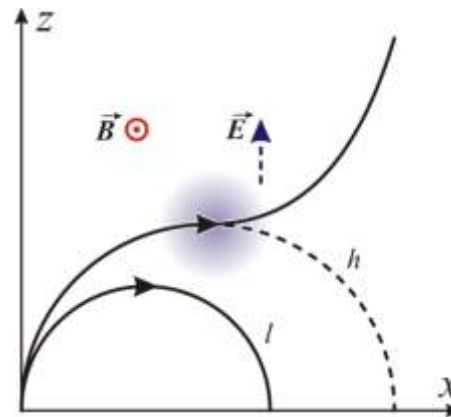


## Недостатки

- **Высокая минимальная мощность (4 МВт)**
- **Собранный материал выводит торцевые коллектора из строя**
- **Сложный процесс изъятия и очистки всех 3-х коллекторов**
- **Не модульный**



1. Скорости ионов в электромагнитном поле зависят от их массы и заряда
2. Путем выбора величины электронной температуры возможно получение плазмы однозарядных ионов для элементов с  $Z \geq 20$
3. Компенсация объемного заряда в плазме позволяет достигать токов, требуемых для высокой производительности: преимущество над электромагнитным разделением изотопов



Механизм плазменной сепарации ОЯТ  
(синим отмечена область действия сильного электрического поля)



## Плазменная сепарация

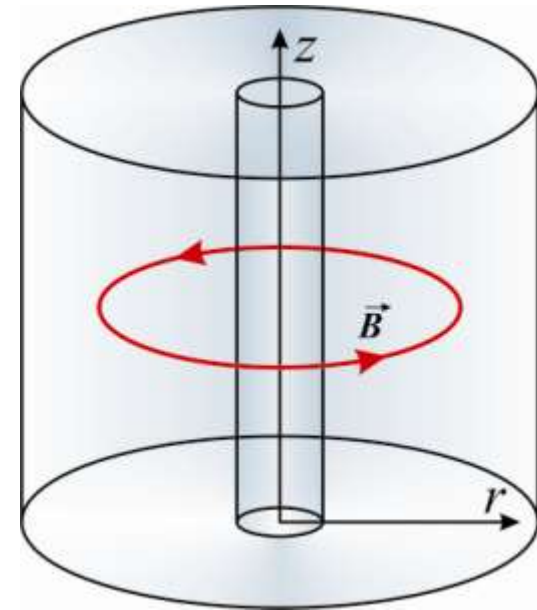
### азимутальное магнитное поле

Азимутальное поле [Э]  $H = 0.2I_c/r$

$I_c$  – ток центрального токопровода, [A]

$r_c$  – радиус центрального токопровода, [см]

$r$  – расстояние до оси камеры, [см]



Безразмерные величины:

- время  $t_0 = 1/\omega_0$        $\omega_0 = eH_0/m_0c$
- скорость  $v_0 = a\omega_0$
- масса  $\mu = m/m_0$
- энергия  $\varepsilon_0 = m_0(a\omega_0)^2$
- электрический потенциал  $\Pi_0 = \varepsilon_0/e$

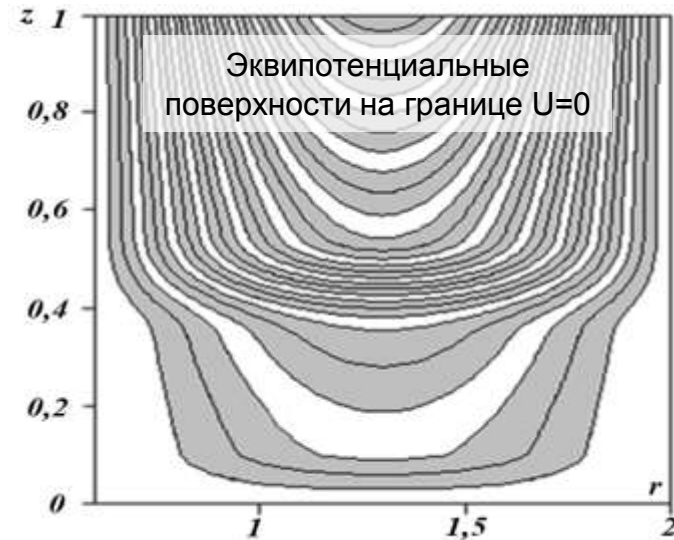
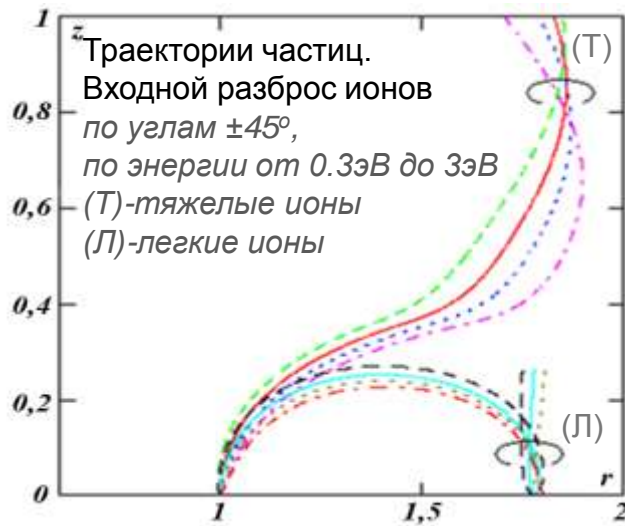
Задаваемые величины:

- масса тяжелого иона, движущегося в полях –  $m_0$
- характерная длина  $a > r_c$
- напряжённостью магнитного поля  $H_0$  на радиусе  $r_0 = a$



# Плазменная сепарация

## азимутальное магнитное поле



$$\Pi = [\alpha \Pi_0(r, z) + \beta B_R(r) B_Z(z)] G(r') G(z'),$$

$$r' = (R_G - r) / \lambda_r, \quad z' = (Z_G - z) / \lambda_z$$

$$\Pi_0(r, z) = (z / Z_g)^{n_z} [(r - r_c) / (R_g - r_c)]^{n_r},$$

$$B_R(r) = \frac{(r - r_c)(R_c - r)}{0.25(R_c - r)^2},$$

$$B_Z(z) = \begin{cases} 0, & \xi \leq 0 \\ \sin^2 \xi, & 0 < \xi \leq \pi/2, \\ 1, & \pi/2 < \xi \end{cases} \quad \xi = \frac{\pi}{2} \frac{z - z_b}{dz_b},$$

$$G(x) = \begin{cases} x(2 - x), & 0 < x < 1 \\ 1, & x \geq 1 \end{cases}.$$

$$dr/dt = v_r, \quad \mu dv_r/dt = -\Pi'_r - v_z/r$$

$$dz/dt = v_z, \quad \mu dv_z/dt = -\Pi'_z + v_r/r$$

Граничные условия:  $\Pi(r, z) = 0$  на границе камеры (на торце  $z = 0$ , на токопроводе  $r = r_c$ , на верхнем торце  $z = Z_g$  и на внешнем коаксиале  $r = R_g$ ).

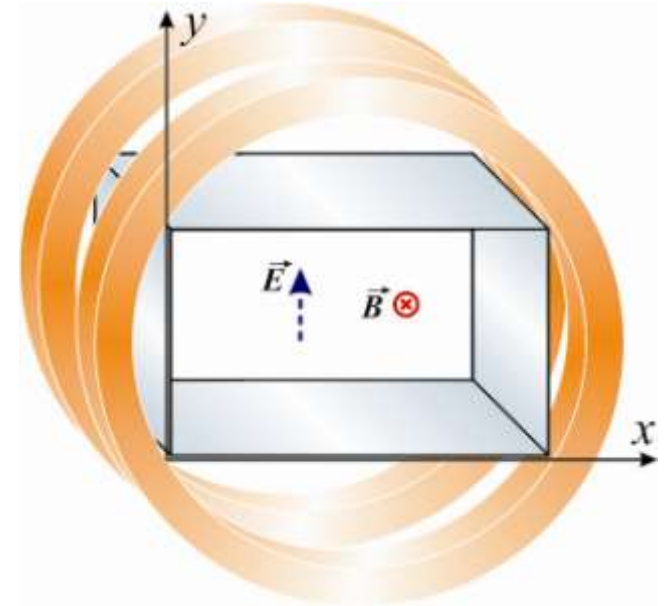
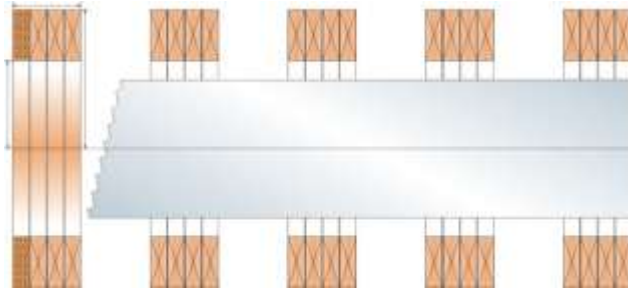
Начальная скорость определяется энергией  $\varepsilon_0$  и углом  $\theta$  отклонения от оси  $z$

$$v_0 = \sqrt{2\varepsilon_0 / \mu}, \quad v_r = \sin(\theta) v_0, \quad v_z = \cos(\theta) v_0$$



# Плазменная сепарация

## аксиальное магнитное поле



Потенциал зависит от одной координаты  $\Pi(y)$ ,  $\Pi(0)=0$

Источник ионов ограничен по ширине  $\{y=0, x_s < x < x_s + \delta_s\}$

Начальная скорость ионов  $v_y = 0$

$$v_x = v_{x0} + y / \mu$$

$$\varepsilon_y - \varepsilon_{y0} = -\Pi(y) - \left[ v_{x0} y + \frac{1}{2\mu} y^2 \right] = -\Pi(y) - \left[ \sin \theta \sqrt{\frac{2\varepsilon_0}{\mu}} y + \frac{1}{2\mu} y^2 \right]$$

$\theta$  – начальный угол отклонения от оси Y

Условие возможного движения ионов

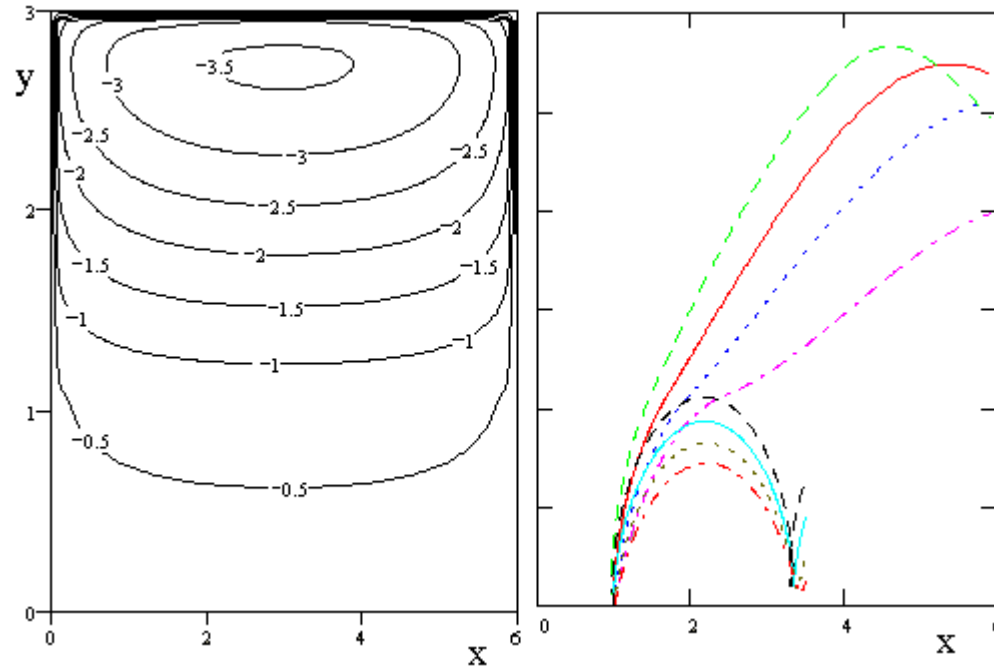
$$\Pi(y) < \varepsilon_{y0} - \left[ \sin \theta \sqrt{\frac{2\varepsilon_0}{\mu}} y + \frac{1}{2\mu} y^2 \right]$$





# Плазменная сепарация

## аксиальное магнитное поле



Эквипотенциали с учётом боковых границ и траектории ионов

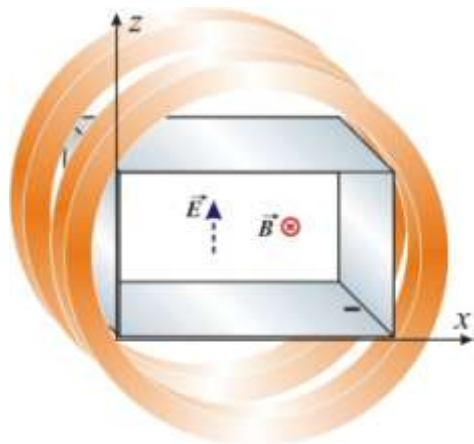
Начальная энергия 0.2, 2 эВ, угол  $\pm 45^\circ$

$H = 1$  кГс, размер  $a = 16.5$  см,  $U_{\min} = -395$  эВ.

$$U(x, y) = \left( -\Pi(y) - \left[ \sin \theta \sqrt{\frac{2\varepsilon_0}{\mu}} y + \frac{1}{2\mu} y^2 \right] \right) (s[1-s])^{0.2} \quad s = x/X_g$$

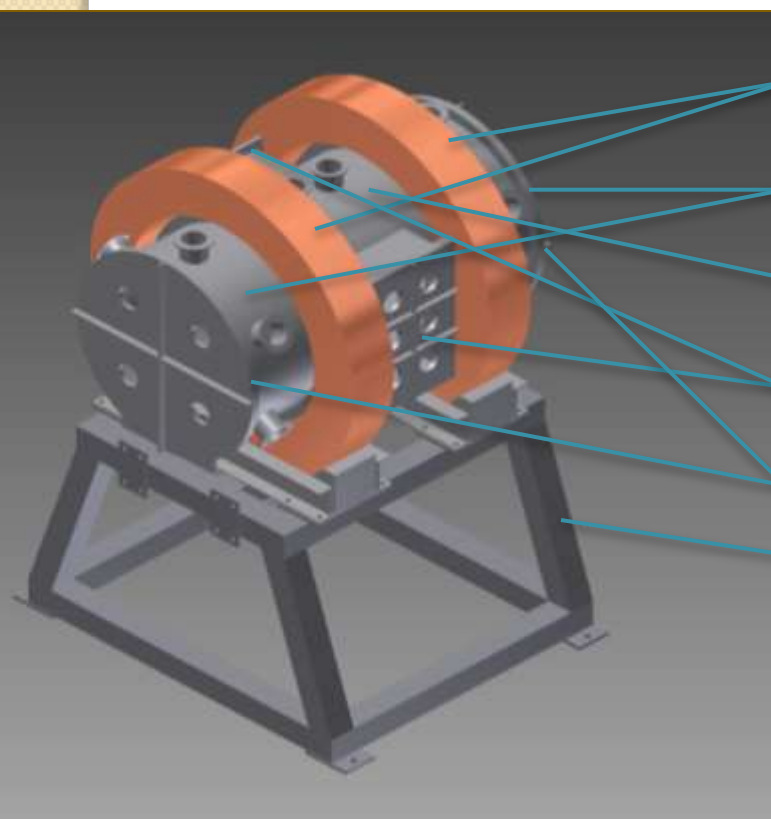


# Линейная система плазменной сепарации ОЯТ



## Расчетные параметры магнитной системы

- Ток витка – 874 А
- Магнитное поле на оси системы – 1600 Гс
- Внутренний радиус камеры – 50 см
- Внутренний объем камеры –  $\sim 2 \text{ м}^3$
- Материал катушек – медь
- Падение напряжения на катушках – 34 В
- Мощность тепловых потерь –  $\sim 30 \text{ кВт}$
- Объемный расход воды системы охлаждения –  $\sim 1 \text{ л/с}$



- Магнитные катушки соленооида
- Боковые камеры
- Центральная камера
- Фланцы боковой загрузки
- Торцевые фланцы
- Крепежный каркас

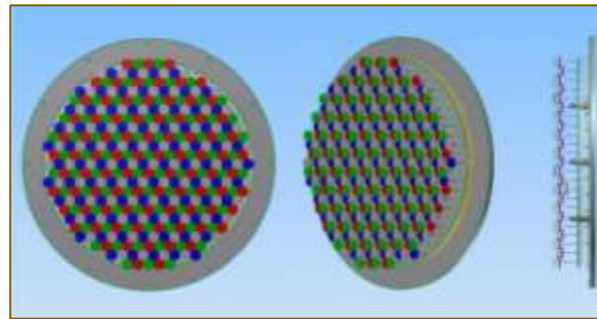


Модульная конструкция





# Экспериментальный стенд



# Спасибо за внимание!



РОСАТОМ



РАН



ОИВТ РАН



МИФИ



НИИЭФА



НИКИЭТ



НИИАР