

Научно-исследовательская работа на тему:  
**«Мониторинг и диагностика  
ядерных реакторов»**

Студент: Гисубизо Конфьянс Оливьер  
Научный руководитель: Салахутдинов Г. Х.

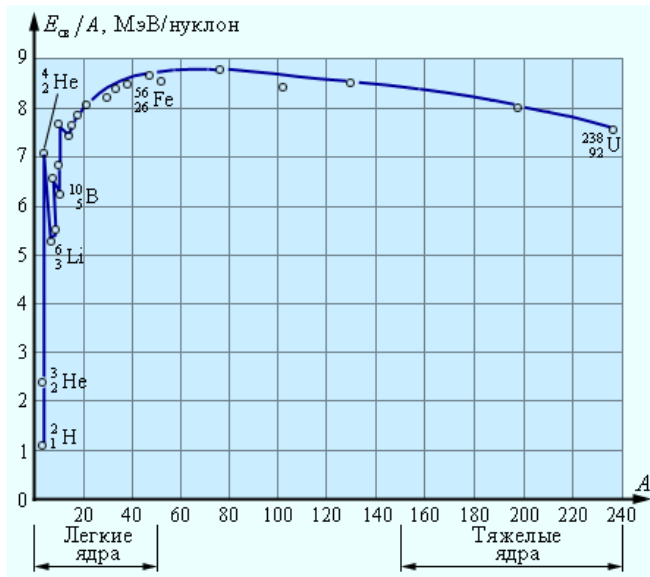
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

Институт Ядерной Физики и Технологий  
Кафедра экспериментальных методов ядерной физики

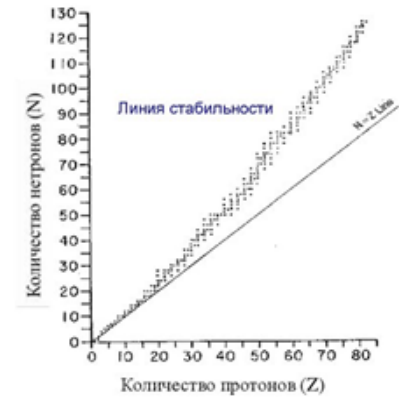
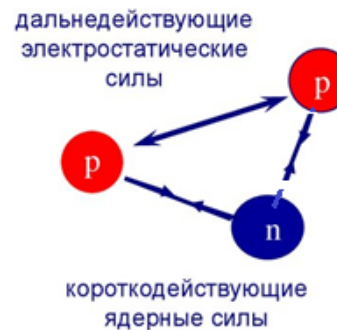
Москва, 2026

# Удельная энергия связи и стабильность ядер

Переход к тяжёлым элементам сопровождается уменьшением удельной энергии связи. Поэтому тяжёлые ядра менее устойчивы и легче подвергаются делению.



## СТАБИЛЬНЫЕ ЯДРА



Нестабильность тяжёлых ядер является физической основой осуществления реакции деления и создания ядерного реактора.

92 нейтрона,  
массовое число 235  
(суммарное число  
протонов и нейтронов  
в ядре)

Ядро атома  
урана  
 ${}_{92}^{235}\text{U}$

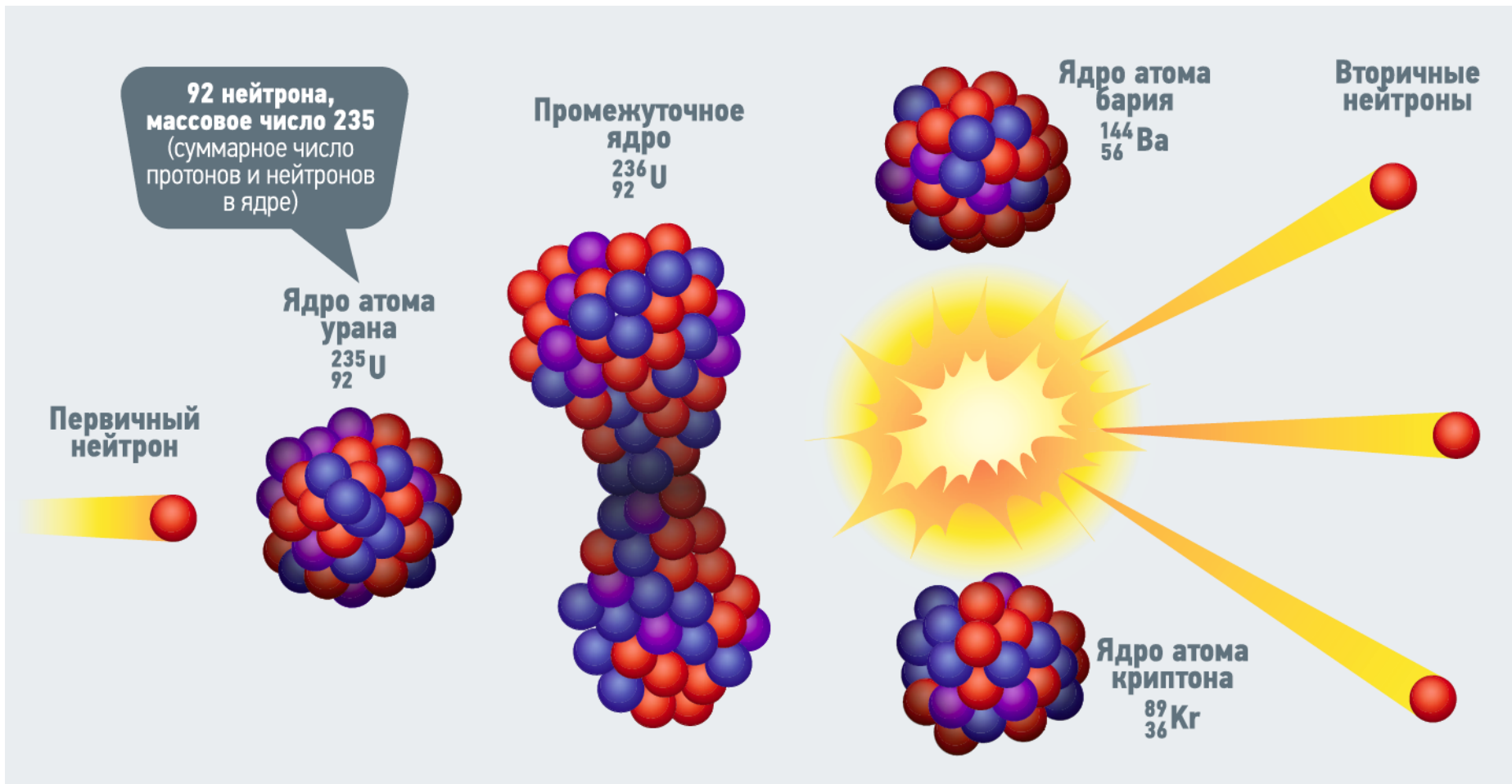
Первичный  
нейтрон

Промежуточное  
ядро  
 ${}_{92}^{236}\text{U}$

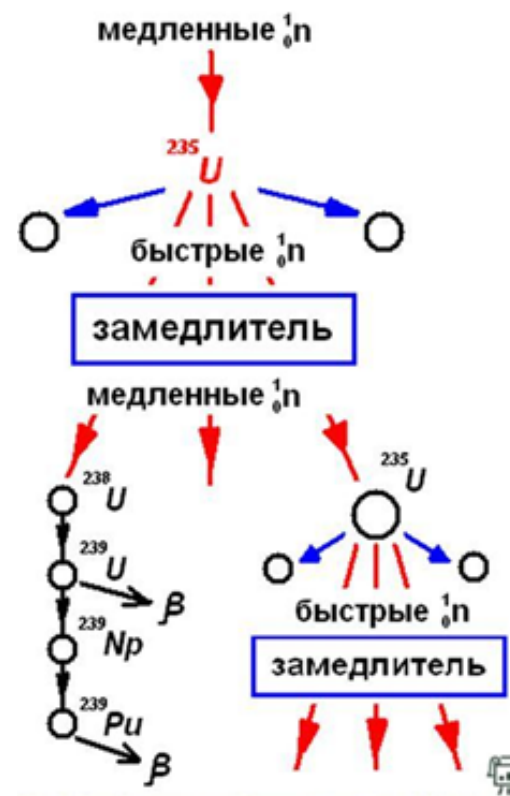
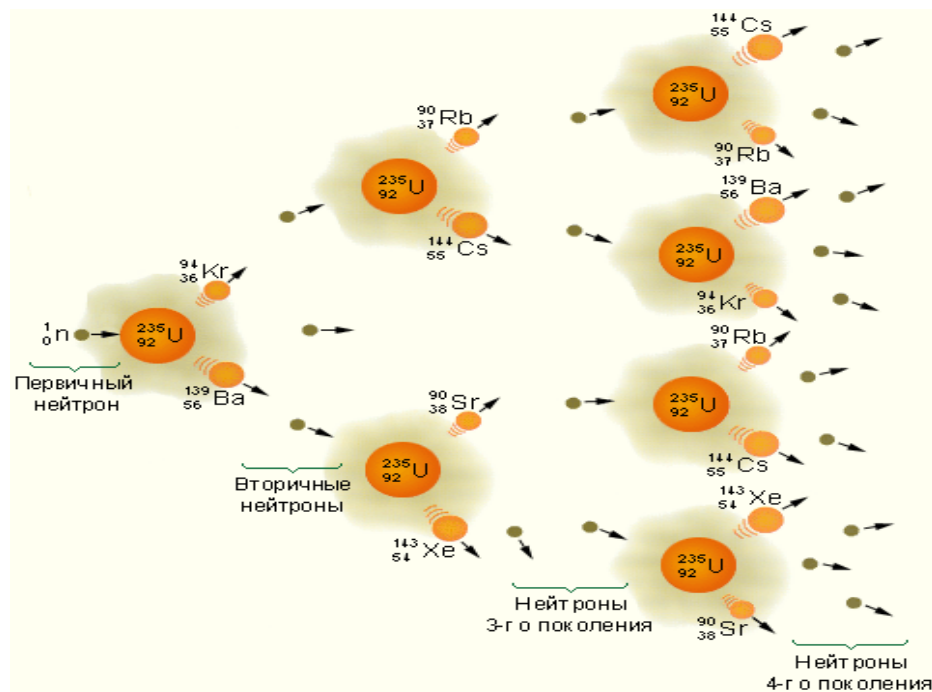
Ядро атома  
бария  
 ${}_{56}^{144}\text{Ba}$

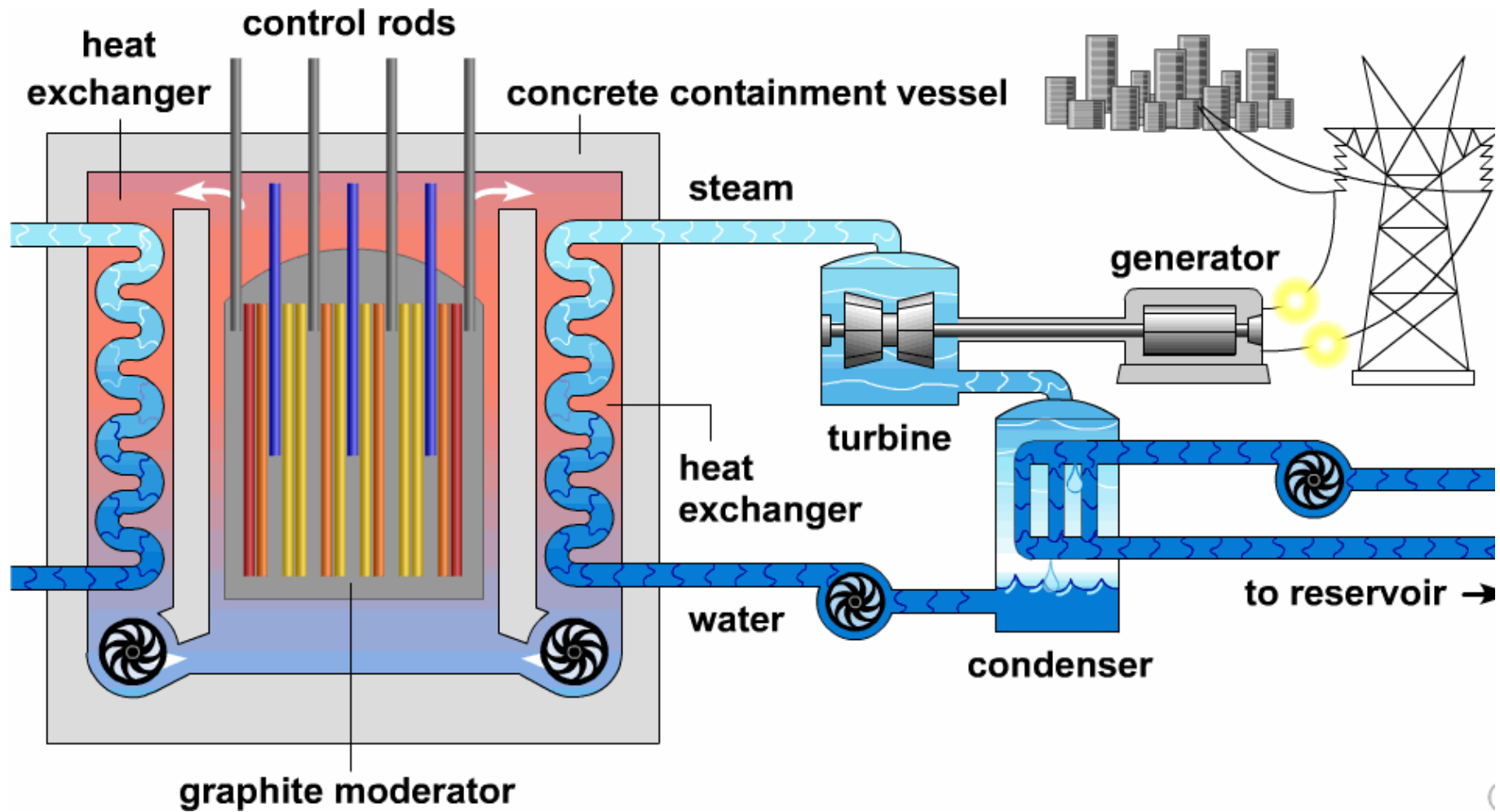
Вторичные  
нейтроны

Ядро атома  
криптона  
 ${}_{36}^{89}\text{Kr}$



## Процессы в ядерном реакторе



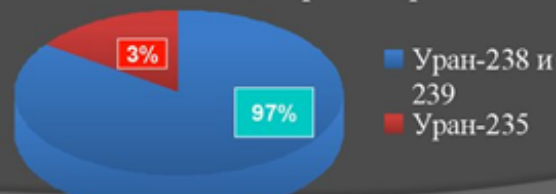


## Ядерное топливо

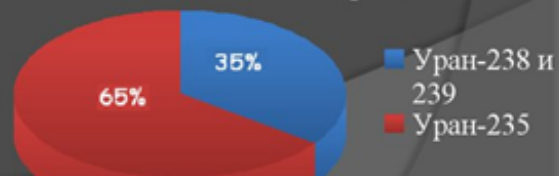
Ядерное топливо представляет собой таблетки, диаметром 1 см и высотой 1,5 см. Они загружаются в трубки длиной 3,5 м и диаметром 1,4 см, изготовленные из циркония. Трубки называются **тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ)** и собираются по 18 штук в тепловыделяющие сборки (ТВС), которые загружаются в каналы активной зоны. Две ТВС образуют кассеты.



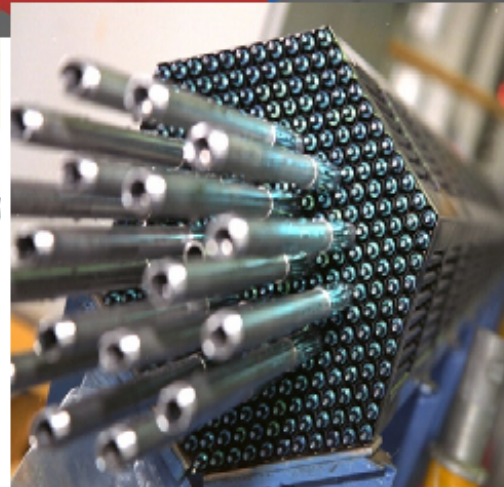
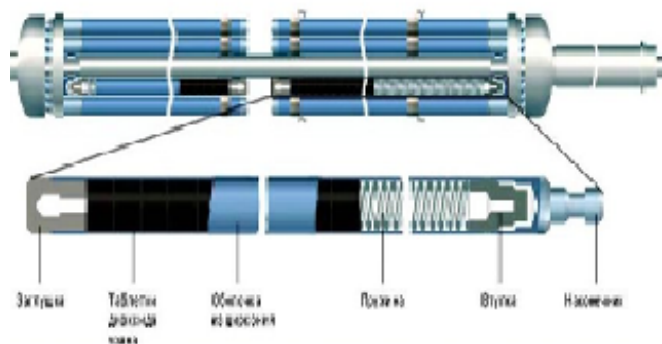
### Состав для реактора



### Состав для взрыва




### ТВЭЛ (Тепловыделяющий элемент)



# Ядерное топливо как объект диагностики

**Ядерное топливо**

Ядерное топливо представляет собой таблетки, диаметром 1 см и высотой 1,5 см. Они загружаются в трубки длиной 3,5 м и диаметром 1,4 см, изготовленные из циркония. Трубки называются тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ) и собираются по 18 штук в тепловыделяющие сборки (ТВС), которые загружаются в каналы активной зоны. Две ТВС образуют кассеты.



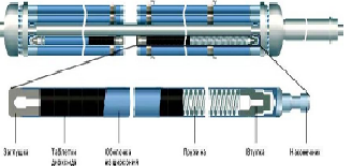
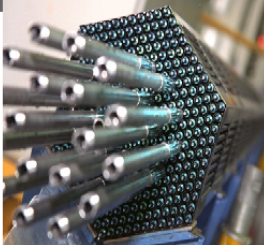
**Состав для реактора**

Уран-238 и 239	97%
Уран-235	3%

**Состав для взрыва**

Уран-238 и 239	35%
Уран-235	65%

**ТВЭЛ (Тепловыделяющий элемент)**

Контроль ядерного топлива необходим для оценки герметичности ТВЭЛОВ, выгорания топлива и появления продуктов деления в технологических средах.

- нейтронные измерения связаны с мощностью и выгоранием;
- гамма-спектрометрия показывает радионуклидный состав;
- совместный анализ повышает достоверность диагностики.

**Итог: состояние топлива оценивается не по одному признаку, а по совокупности нейтронных и гамма-сигналов.**

# Мониторинг и диагностика ядерных реакторов

Мониторинг – это проактивный процесс. Он включает в себя наблюдение и поверку качества такие важные компоненты, как сигнализации и отчетность.

Диагностика – это процесс, основанный на реагировании. Он помогает распознавать, обнаруживать и классифицировать неисправности и потенциальные риски для безопасности.

В процессе мониторинга и диагностики ядерных реакторов применяются разнообразные способы и технологии, которые дают возможность отслеживать состояние техники и процессов.

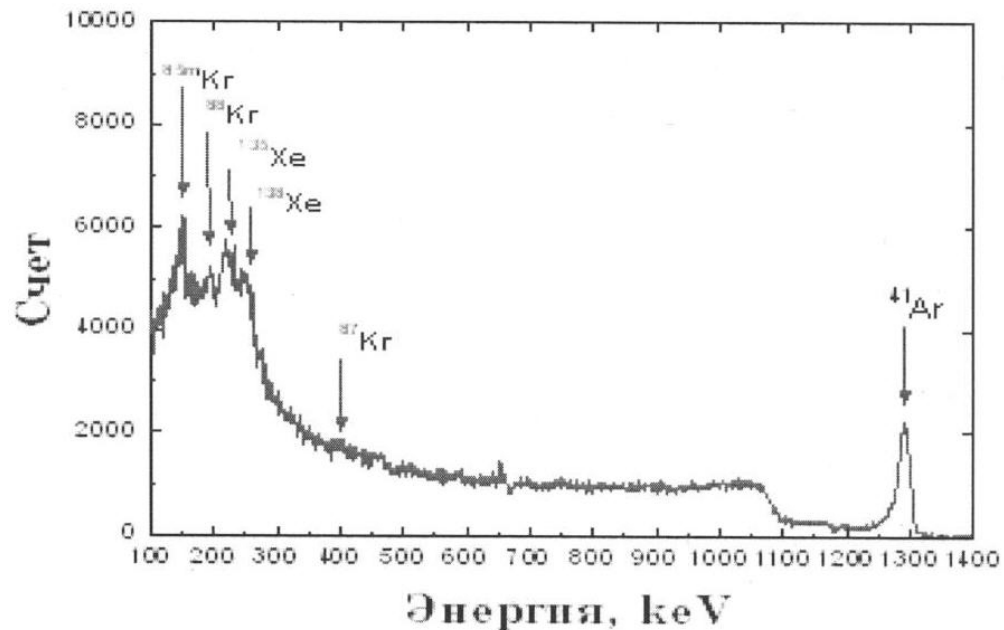
**Гамма-спектрометрический метод** применяется для контроля активности и нуклидного состава газообразных радиоактивных отходов, образующихся при эксплуатации ядерно-энергетических установок. Для этого проводят непрерывный отбор газоаэрозольных проб из вентиляционной трубы ЯЭУ и квазинепрерывную регистрацию автоматизированным гамма-спектрометрическим комплексом нуклидного состава и количества выбросов инертных радиоактивных газов, радиоактивных аэрозолей и йода.

Диагностику топливных элементов:

1. Равномерность распределения топлива в топливных элементах.
2. Количество урана 235.
3. Герметичность топливного элемента.

Решить задачу диагностики можно с помощью сцинтилляционного спектрометра с хорошим энергетическим разрешением. Провести исследования и анализ современных сцинтилляционных детекторов.

# Спектр гамма-излучения



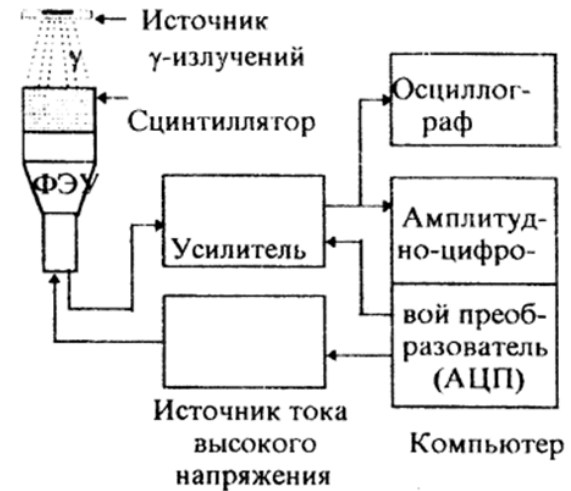
Фиг.1 Спектр гамма-излучения воздушного выброса исследовательского реактора [П1].

На спектре выделяются пики полного поглощения. Положение пика соответствует энергии  $\gamma$ -кванта, а площадь пика связана с активностью радионуклида.

- идентификация изотопов по энергии линий;
- оценка активности по площади пиков;
- контроль выбросов и продуктов деления;
- проверка герметичности и загрязнения.

Для АЭС особенно важны линии радионуклидов, связанных с продуктами деления и активацией конструкционных материалов.

# Аппаратурная схема гамма-спектрометра



Блок схема спектрометра на основе кристалла стронций йод активируемый европием  $\text{SrI}_2(\text{Eu})$  с энергетическим разрешением менее 4% (FWHM)  $^{137}\text{Cs}$  (662 кэВ).

- источник  $\gamma$ -излучения формирует спектр импульсов в детекторе;
- сцинтиллятор и фотоэлектронный преобразователь превращают излучение в электрический сигнал;
- усилитель, АЦП и компьютер выполняют регистрацию и анализ спектра.

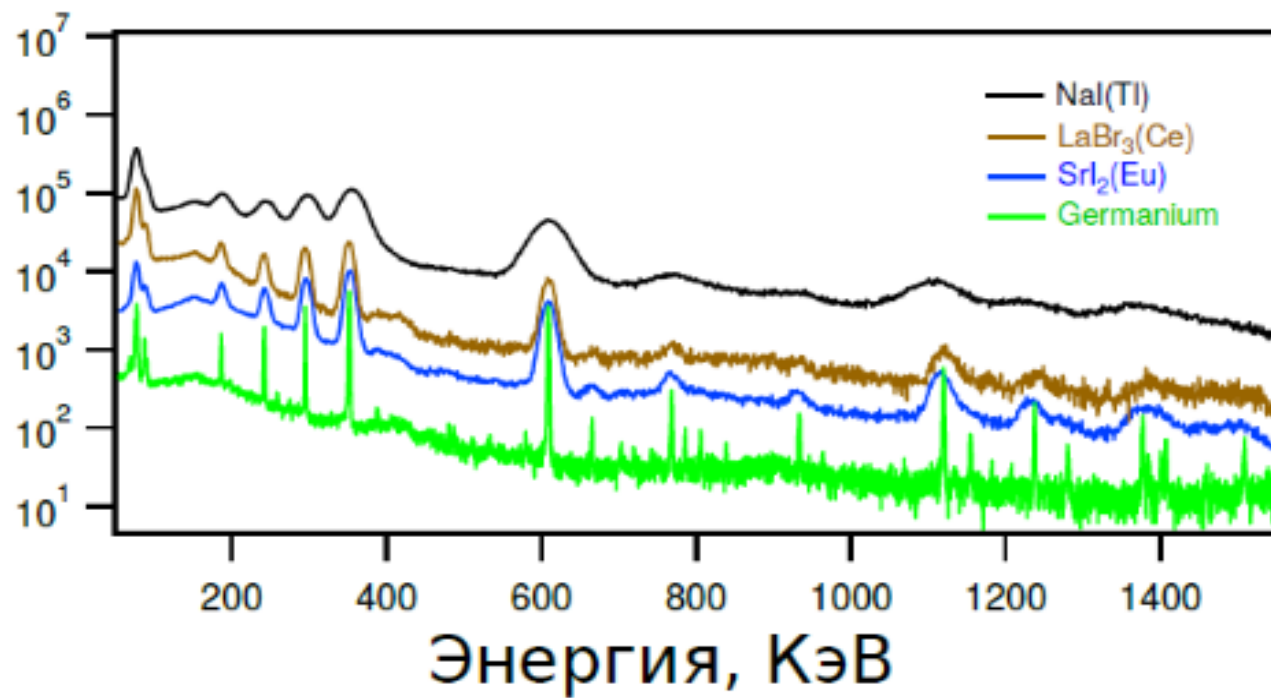


Рис. 3.8. Амплитудный спектр импульсов изотопа  $^{226}\text{Ra}$ , измеренные различными сцинтилляторами и германиевым детектором

R=8% энергетическое разрешение спектрометра

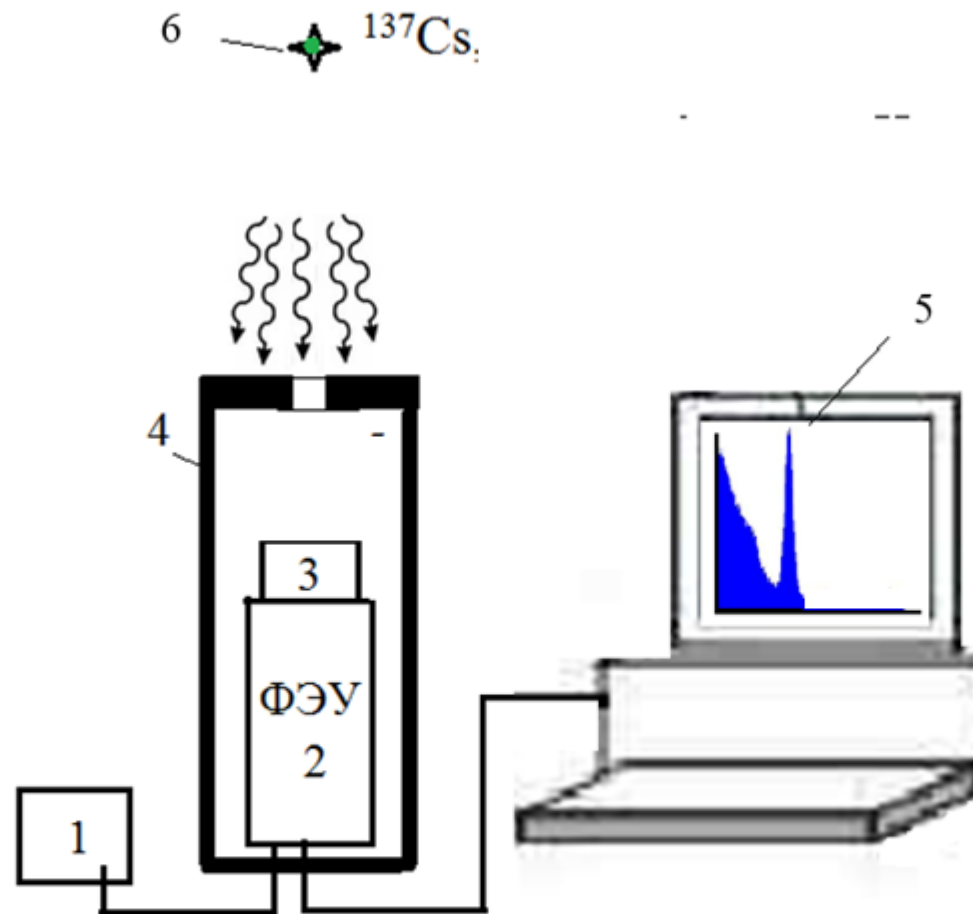


Рис.1 Схема эксперимента: 1- блок высоковольтного питания; 2- фотоэлектронный умножитель (ФЭУ); 3- сцинтилляционный кристалл NaI(Tl); 4- свинцовый кожух; 5- амплитудный анализатор с монитором; 6- источник  $^{137}\text{Cs}$

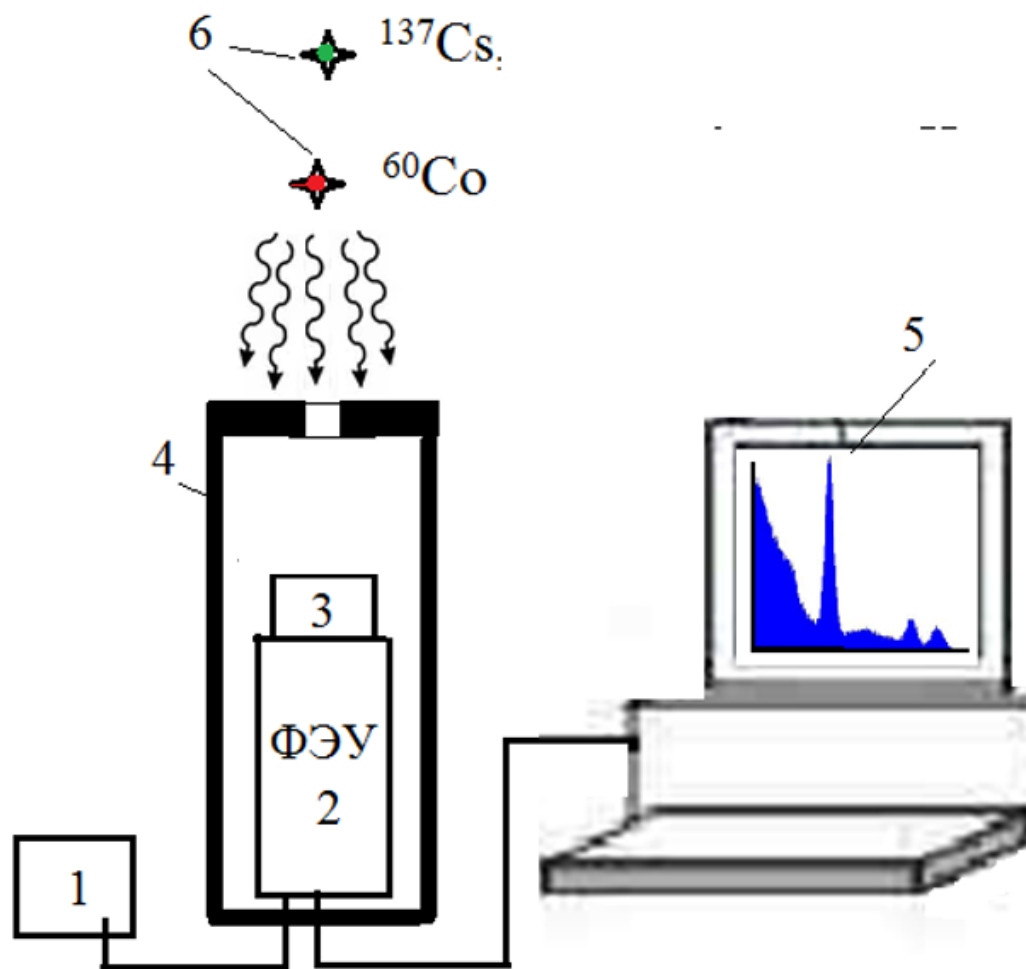
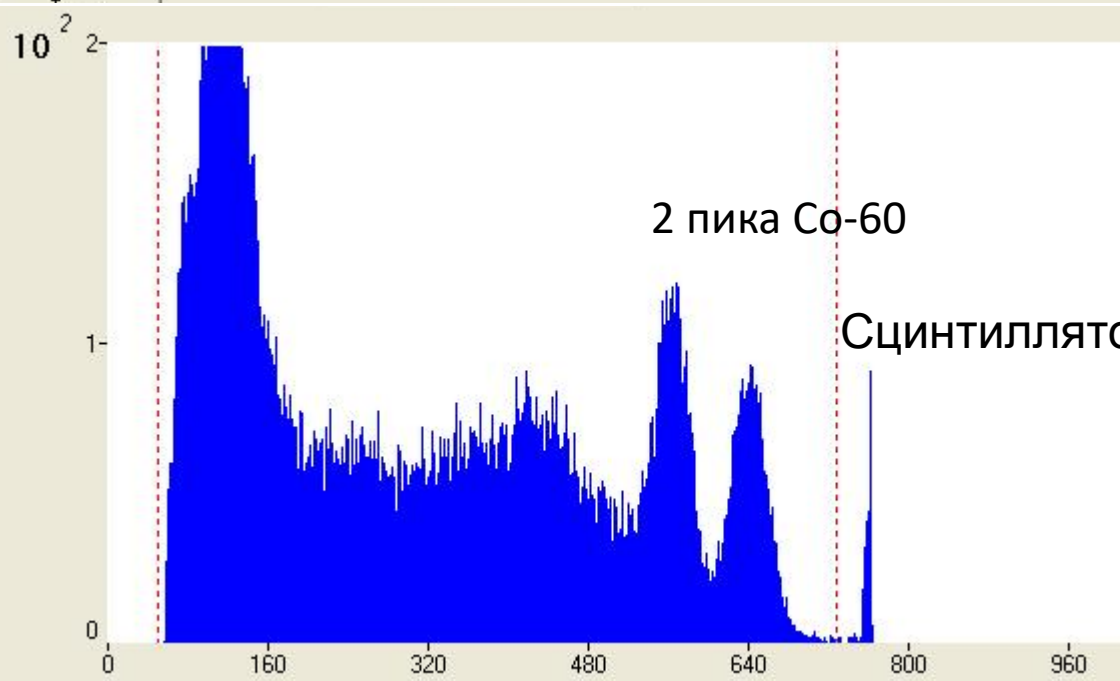
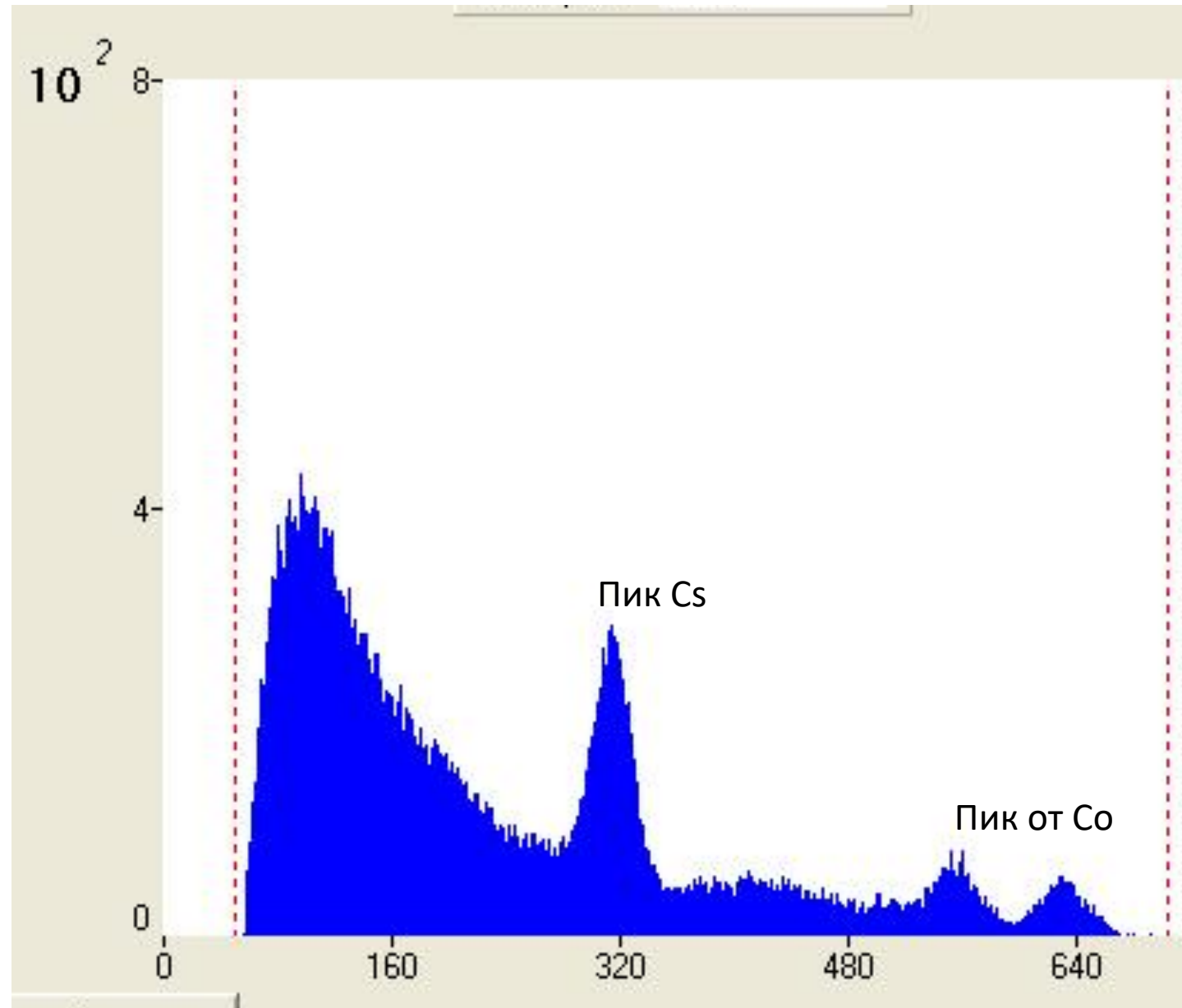


Рис.1 Схема эксперимента: 1- блок высоковольтного питания; 2- фотоэлектронный умножитель (ФЭУ); 3- сцинтилляционный кристалл  $\text{NaI(Tl)}$ ; 4- свинцовый кожух; 5- амплитудный анализатор с монитором; 6- источники  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{60}\text{Co}$ .



Точки



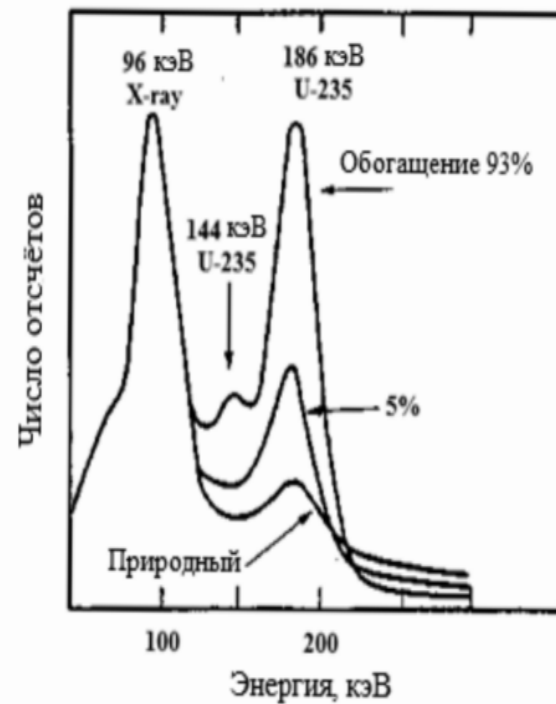
## Гамма-спектрометрия

Для того чтобы определить изотопный состав ядерных материалов, используют метод гамма-спектрометрии с применением сцинтиляционного детектора.

Одним из существенных минусов можно считать плохое разрешение сцинтиляционного детектора, из-за чего энергетические линии фотонов гамма-излучения плохо различимы.

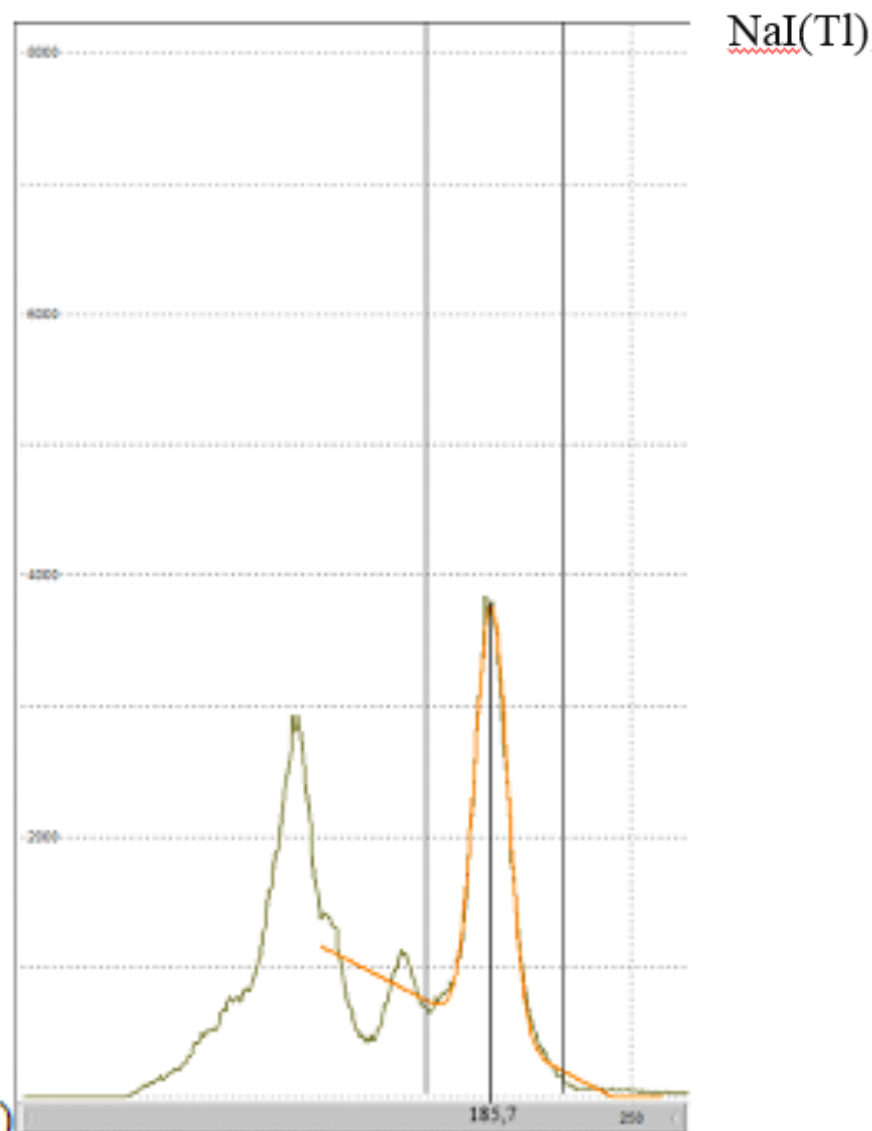
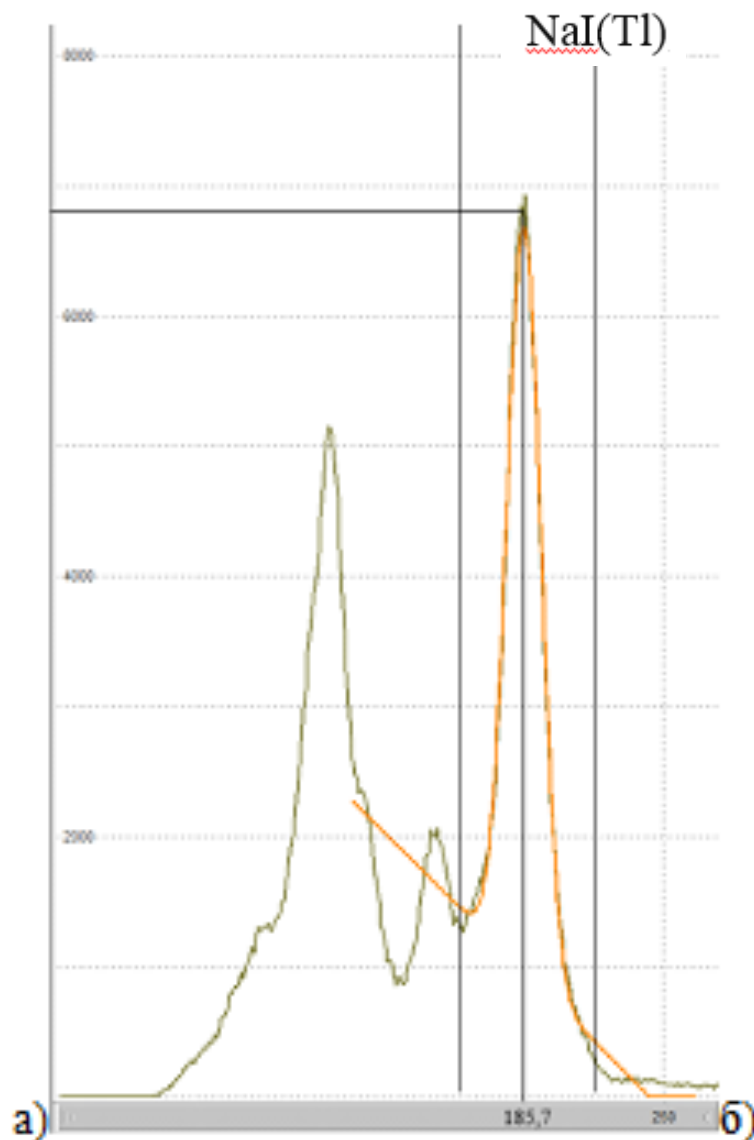
Для урана (U-235) линия только образуется фотонами с энергией 186 кэВ.

Спектры гамма-излучения образцов урана природного, 5 и 93 % обогащения, измеренные сцинтиляционным детектором NaI(Tl).



С помощью сцинтилляционного детектора с кристаллом NaI(Tl) гамма-спектрометрическим методом проведены измерения в системах контроля реактора. В результате измерений определяется степень аварийности в реакторе. Гамма-сцинтилляционный метод позволяет оценить отклонение в работе реактора с точностью  $\sim 2\%$  при заданной стандартной геометрии.

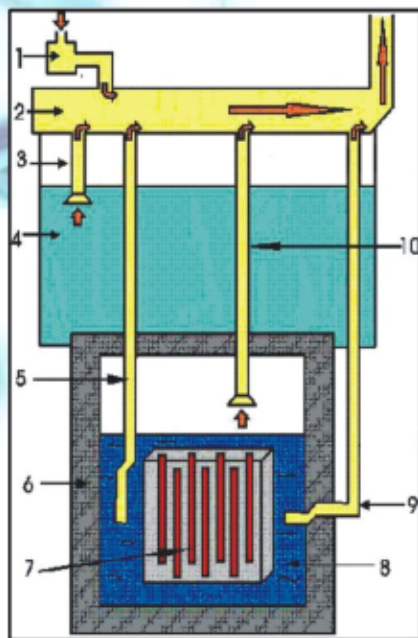
Чтобы определить возможность применения такого метода проведены измерения на стандартном сцинтилляционном спектрометре. В рамках эксперимента использовалось программное обеспечение позволяющее автоматически рассчитать активность известного радионуклида по измеренной интенсивности событий в пике полного поглощения.



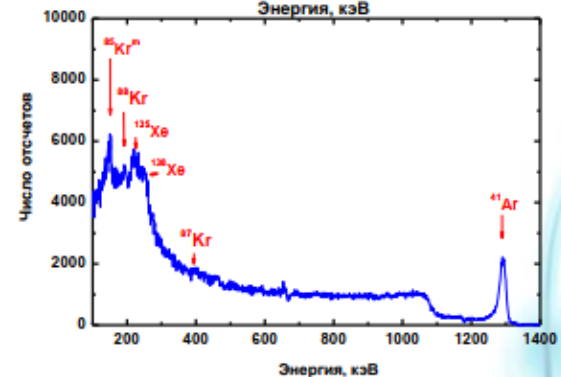
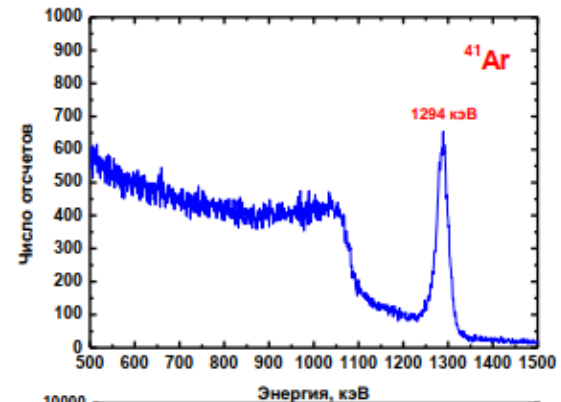
Для урана (U-235) линия с энергией 186 кэВ.

Показано различное количество топлива в твэлы а) 1 год б) 5 лет (количество содержание разное)

# КОНТРОЛЬ ЗА ВЫБРОСАМИ ГАЗООБРАЗНЫХ РАДИОНУКЛИДОВ ИЗ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ



1. Воздухозаборник чистого воздуха.
2. Главный воздуховод специальной вентиляции.
3. Вытяжка из операционного зала.
4. Операционный исследовательский зал.
5. Вертикальная вентиляция.
6. Защитный экран.
7. Реактор.
8. Вода.
9. Горизонтальная вентиляция.
10. Воздухозаборник.



## Выводы

- Мониторинг и диагностика ядерного реактора направлены на безопасную эксплуатацию, раннее обнаружение отклонений и оценку состояния активной зоны.
- Гамма-спектрометрия позволяет идентифицировать радионуклиды, контролировать выбросы, герметичность ТВЭЛОВ и продукты деления.
- Совместное применение радиометрических, дозиметрических, нейтронных и спектрометрических методов повышает достоверность контроля АЭС. Для контроля гамма излучения вполне подходят спектрометры с кристаллами NaI(Tl)

Спасибо за внимание.

Гисубизо Конфьянс Оливьер  
НИЯУ МИФИ, 2026