

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ЗАЩИТНЫХ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗООХЛАЖДАЕМЫХ РЕАКТОРОВ

*В.А. Гурин, В.Ф. Зеленский, А.С. Задворный, С.В. Гоженко, Ю.Н. Ранюк  
ННЦ ХФТИ, г. Харьков, Украина*

Приведено описание установки для контроля герметичности защитных оболочек топливных частиц твэлов высокотемпературного реактора с газовым охлаждением. Определены относительные выходы изотопов  $Kr^{85m}$ ,  $Kr^{87}$ ,  $Kr^{88}$  при фотоделении ядер урана при облучении тормозным излучением с граничной энергией 15 МэВ. Показано, что методика позволяет контролировать герметичность по отношению к газообразным продуктам деления с требуемой чувствительностью

## ВВЕДЕНИЕ

Высокий уровень безопасности независимо от активных энергопитаемых систем модульного высокотемпературного реактора с газовым охлаждением (HTGR) основан на использовании пассивных и собственных характеристик в сочетании с топливом из покрытых оболочкой частиц. Эти его характеристики уже в течение нескольких десятилетий неизменно вызывают интерес у разработчиков. И сейчас концепция производства энергии по технологии модульного HTGR в ряде случаев рассматривается наиболее перспективной [1].

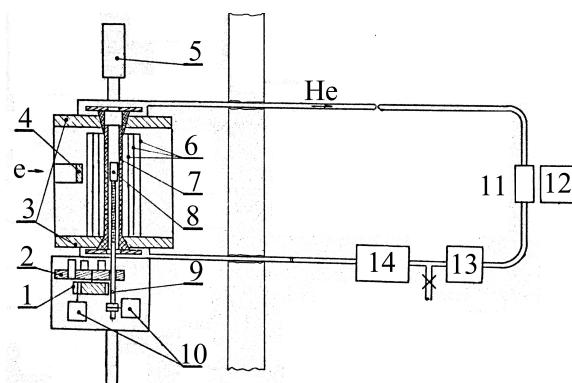
Одним из основных показателей работоспособности твэлов HTGR является их способность к удержанию продуктов деления (ПД) в течение кампании; скорость выхода газообразных продуктов деления (ГПД) не должна превышать  $10^{-6}$  [2]. Внутрореакторные испытания показывают, что выход ГПД через кондиционные оболочки частиц при регламентированных выгораниях ядерного топлива сохраняется на постоянном уровне [2]. Это позволило при отработке технологии осаждения защитных оболочек для контроля герметичности использовать метод "слабого" облучения [3,4]. При этом регистрируются вышедшие из облученных в ядерном реакторе микротвэлов (МТ) ГПД. Территориальная разобщенность мест изготовления МТ и исследовательских реакторов существенным образом ограничивает применимость внутрореакторных методик для оперативного технологического контроля.

Известно, что использование процесса фотоделения позволяет при внереакторных испытаниях изучать утечку ГПД из ядерного топлива в широком диапазоне температур [5,6]. Применение указанного метода для контроля герметичности оболочек топливных частиц стало возможным с появлением высокоинтенсивных ускорителей электронов. Сравнительная распространенность и компактность ускорителей электронов даёт предпосылки для создания установок контроля, ориентированных на обеспечение технологических нужд производства [7]. Данная

работа посвящена созданию методики контроля герметичности защитных оболочек МТ твэлов HTGR.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Блок-схема установки для экспериментального определения чувствительности метода контроля герметичности с использованием процесса фотоделения ядер урана представлена на рис.1.



*Рис.1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 - мальтийский крест; 2 - ротор; 3 - токоподводы; 4 - вольфрамовый конвертор; 5 - радиационный пирометр; 6 - графитовые экраны; 7 - графитовый нагреватель; 8 - контейнер с МТ; 9 - шток подачи; 10 - электродвигатели; 11 - поглотительная колонка; 12 - Ge(Li)-детектор; 13 - компрессор; 14 - поглотитель*

Установка содержит: узлы нагрева проб, смены проб, конвертора, транспортировки ГПД к ловушке,  $\gamma$ -спектрометра. Она смонтирована на низкоэнергетичном выходе ускорителя электронов ЛУЭ-300 ННЦ ХФТИ. Узел нагрева проб содержал полый графитовый нагреватель, через который постоянно прокачивался гелий. Регулирование подводимой к нагревателю электрической мощности позволяло поддерживать температуру проб с точностью  $\pm 5^\circ\text{C}$  ( $1200^\circ\text{C}$ ), регистрировали температуру нагревателя и контейнера с пробой вольфрам-рениевой

термопарой ВР 5/20 и, в отдельных случаях, радиационным пирометром типа ТЕРА-50.

Узел смены образцов состоит из барабана на 15 проб (контейнеры графитовые), жестко соединенного с крестом 1 и штоком 9 подачи проб в нагреватель.

Узел электронно-фотонного конвертора 4 постоянно охлаждался проточной водой и содержал вольфрамовую пластину толщиной 1,2 мм. На конвертор подавался пучок электронов с энергией 15 МэВ.

Транспортировка ГПД от пробы к ловушке проводилась потоком гелия через трубопровод диаметром 5 мм, длиной 18 м. Выделение ГПД в ловушке проходило на охлажденном до температуры жидкого азота цеолите. Ловушка располагалась в непо-

средственной близости от Ge(Li)-детектора  $\gamma$ -спектрометра. Суммарная потеря ГПД в установке не превышала 4 %.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При обработке методических вопросов регистрации продуктов фотоделения облучался металлический уран, топливные керны из двуокиси урана и МТ. На конвертор подавался пучок электронов энергией 15 МэВ, средний ток пучка 13 мкА.

Образцы из металлического урана, как правило, облучались при комнатной температуре и в конце облучения нагревались до 1130 °С. Измерение активности в ловушке показало, что при комнатной температуре во время экспериментов из урана в поток гелия выходило не более 4 % ГПД, выделившихся при отжиге образца. Типичная зависимость изменения активности ловушек от времени и температуры отжига металлического урана представлена на рис. 2.

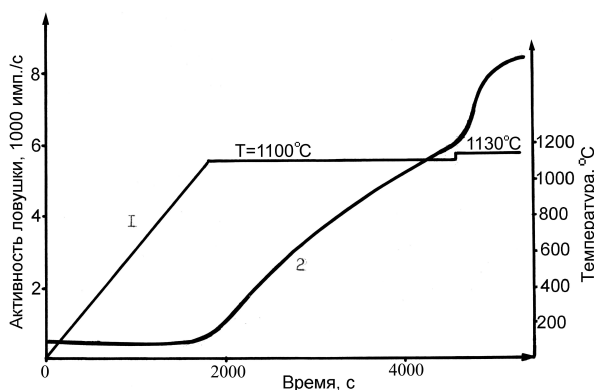


Рис.2. Выход продуктов фотоделения из металлического урана: 1—температура образца, 2—активность ловушки

Типичный  $\gamma$ -спектр зарегистрированной активности приведен на рис.3.

Выход наиболее часто регистрируемых в процессе внутриреакторных исследований герметичности МТ изотопов  $Kr^{85m}$ ,  $Kr^{87}$ ,  $Kr^{88}$ ,  $Xe^{135}$  при фотоделении урана приведен в таблице.

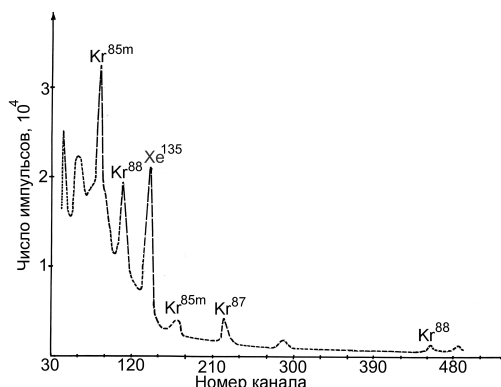


Рис.3. Гамма-спектр активности газовыделения из металлического урана при отжиге

### Выход изотопов криптона при фотоделении урана

Изотоп	Период полураспада	Энергия $\gamma$ -квантов, кэВ	Интенсивность $\gamma$ -линий, отн. ед.	Относительный выход, %*
$Kr^{87}$	76 мин	403	$0,75 \pm 0,1$	$2,6 \pm 0,52$
$Kr^{88}$	2,805 ч	191	$0,69 \pm 0,1$	$2,4 \pm 0,48$
$Kr^{85m}$	4,48 ч	305	$0,37 \pm 0,07$	$1,2 \pm 0,24$
$Xe^{135}$	9,14 ч	250	1	3,5[8]

\* Нормировано к полному выходу 200 %.

Область применения описанного устройства для контроля герметичности оболочек определяется пределом обнаружения минимального количества контролируемого изотопа в условиях эксперимента. Поскольку сигналом, несущим количественную информацию, является ионизирующее излучение радиоактивных ядер, нижняя граница измерения проницаемости зависит от минимального числа распадов, которое может быть зарегистрировано с достаточной надежностью. Этот минимум определяется флуктуацией помех (фона), присутствующих при измерении.

В данных исследованиях регистрировалась активность радиоактивных изотопов Кг и Хе, вышедших из образца и накопившихся в ловушке. Анализ

$\gamma$ -спектров этой активности показал отсутствие  $\gamma$ -линий изотопов, не связанных с газовыделением. Поэтому источником информации о газовыделении из пробы может служить общая активность излучения и активность отдельных  $\gamma$ -линий, т.е. нижняя граница регистрации определяется фоном ( $a_{\phi}$ ) в условиях эксперимента.

Оценку нижнего предела регистрации К ( $R/V$ ), где  $R$  – количество прошедших через оболочку продуктов деления ядерного топлива,  $V$  – количество образовавшихся) выхода ГПД проводилась по формуле [9]:

$$K = \frac{4.65 \sqrt{a_{\phi}}}{\varepsilon \cdot \Phi \cdot \sigma \cdot N_a} \left(1 - e^{-\lambda t_{\text{обл.}}}\right) \left(1 - e^{-\lambda t_{\text{наб.}}}\right) e^{-\lambda t_{\text{охл.}}} F \approx \approx$$

$$\frac{C}{F} \cdot \frac{\sqrt{t_{\text{наб.}}}}{I_e \cdot m \cdot T_{1/2} \cdot \left(1 - e^{-\lambda t_{\text{обл.}}}\right) \left(1 - e^{-\lambda t_{\text{наб.}}}\right) e^{-\lambda t_{\text{охл.}}}}$$

где:  $I_e$  – ток пучка электронов;  $m$  – масса урана в образце;  $C$  – коэффициент, зависящий от фоновых условий эксперимента;  $\Phi$  – плотность потока  $\gamma$ -квантов, вызывающих фотоделение урана;  $N_a$  – число атомов урана в пробе;  $\sigma$  – сечение выхода радиоактивного изотопа;  $t_{\text{обл.}}$  – время облучения образца;  $t_{\text{охл.}}$  – интервал времени между облучением и измерением наведенной активности;  $t_{\text{наб.}}$  – время регистрации активности;  $T_{1/2}$  – период полураспада;  $\lambda = 0,693/T_{1/2}$  – константа распада;  $\varepsilon$  – эффективность регистрации гамма-излучения;  $F$  – эффективность поглощения ГПД в колонке.

Зависимость фоновых коэффициентов от энергетической области представлена на рис.4 (масса урана в пробе 10 г, средний ток ускоренных электронов 10 мкА, оптимальные временные интервалы, Ge(Li)-детектор объемом 100 см<sup>3</sup>, разрешением ~30 кэВ по линии 1172 кэВ Co<sup>60</sup>).

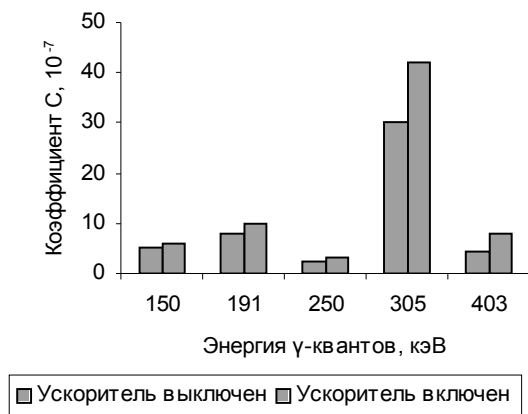


Рис.4. Зависимость фоновых коэффициентов от энергетической области регистрации  $\gamma$ -квантов

Нижний предел регистрации  $K$  для наиболее часто контролируемых изотопов криптона и ксенона представлен на рис.5 (масса урана в пробе 10 г, средний ток ускоренных электронов 10 мкА, ускоритель выключен, оптимальные временные интервалы

лы, Ge(Li)-детектор разрешением ~3 кэВ по линии 1172 кэВ Co<sup>60</sup>).

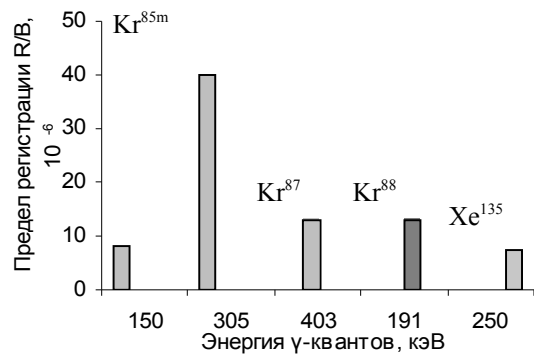


Рис.5. Пределы регистрации утечки продуктов фотоделения через защитную оболочку

## ВЫВОДЫ

1. Использование ускорителей электронов является эффективным методом моделирования поведения покрытий на начальных стадиях эксплуатации.

2. Разработанное устройство в сочетании с интенсивным ускорителем электронов позволяет обеспечить требуемую чувствительность и точность контроля герметичности оболочек разрабатываемых твэлов НТГР.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Бюллетень МАГАТЭ*. 43/3/2001, с. 44–45.
2. В.Ф. Зеленский, В.А. Гуринов, Ю.Ф. Конотоп, Н.П. Одейчук, С.С. Чайка, С.В. Гоженко, и др. Топливные композиции для ВТГР // *Труды Международной конференции по радиационному материаловедению*. 1990, т. 4, с. 73–82.
3. N.N. Ponomarev-Stepnoy, A.A. Khrulev // *Third Intern. Conf. Thermo-Sonic Energy*. Julich, 1972.
4. B.F. Myers, N.L. Baldwin, N.E. Rell // *Nuclear Technology*. 1977, v. 35, 2, p.501.
5. E.E. Anderson., P.E. Gethard, L.R. Zumwalt // *Trans. Amer. Nucl. Soc.* 1962, v. 5, N1, p. 241.
6. А.С. Задворный, А.Ф. Горенко, С.В.Гоженко. А.С. № 609123.
7. Ю.Н. Бурмистенко. *Фотоядерный анализ состава вещества*. М.: «Энергоатомиздат», 1986.
8. Э. Хайд, И. Перлман, Г. Сиборг. *Деление ядер*. М.: «Атомиздат», 1969, с. 342–358.
9. Р.А. Кузнецов. *Активационный анализ*. М.: «Атомиздат», 1973, с. 343.

## ВИКОРИСТАННЯ ПРИСКОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОНІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ЗАХИСНИХ ОБОЛОНОК ТВЭЛІВ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ГАЗООХОЛДЖУЄМИХ РЕАКТОРІВ

В.А. Гурін, В.Ф. Зеленский, А.С. Задворний, С.В. Гоженко, Ю.Н. Раянюк

Приведено опис установки для контролю герметичності захисних оболонок паливних часточок твэлів високотемпературного реактора із газовим охолодженням. Визначено відносні виходи ізотопів Kr<sup>85m</sup>, Kr<sup>87</sup>, Kr<sup>88</sup> при фотоділенні ядер урану при опроміненні гальмовим випромінюванням із граничною енергією 15 МеВ. Показано, що методика дозволяє контролювати герметичність стосовно газоподібних продуктів розподілу з необхідною чутливістю.

## APPLICATION OF ELECTRON ACCELERATORS FOR TIGHTNESS CONTROL OF PROTECTIVE SHELLS

### FOR FUEL ELEMENTS OF HTGR

*V.A. Gurin, V.F. Zelenskiy, A.S. Zadvorniy, S.V. Gozhenko, Y.N. Ranyuk*

The plant for checking the containment of protective shell of small fuel elements of high temperature reactor with gas cooling is described. The relative output of  $\text{Kr}^{85m}$ ,  $\text{Kr}^{87}$ ,  $\text{Kr}^{88}$  isotopes under uranium nuclei photofission at irradiation by bremsstrahlung with border energy 15 MEV is determined. It is shown that the method allows checking the containment regarding gaseous products of the fission with required sensitivity.