

УДК 621.039.5

ОЦЕНКА ВЫХОДА ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ ИЗ ТВЭЛОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ВОТК НОУ В ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ РЕАКТОРА ИВГ.1М

Медетбеков Б.С., Попов Ю.А., Жмук Д.В.

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Настоящая работа посвящена оценке активности теплоносителя реактора ИВГ.1М и оценке выхода продуктов деления (ПД) из ТВЭлов экспериментальных водоохлаждаемых технологических каналов с низкообогащенным ураном (ВОТК-НОУ) пробноотборным гамма-спектрометрическим методом. В статье представлены результаты исследований двух экспериментальных ВОТК-НОУ по определению выхода ПД в теплоноситель реактора ИВГ.1М пробноотборным гамма-спектрометрическим методом. Приведен сравнительный анализ изменения выхода ПД как из экспериментальных ВОТК-НОУ, так и из штатных ВОТК в рассмотренном диапазоне энерговыделения в реакторе до 630 МВт·час. Результаты исследований показывают, что выход ПД остается неизменным в пределах флуктуаций при проведении более 30 реакторных экспериментов. В работе показано, что выход ПД из экспериментальных ВОТК-НОУ, усредненный по всем зарегистрированным ПД до $R/B = 5 \cdot 10^{-7}$ может считаться допустимым по сравнению с расчетным выходом для герметичных ТВЭлов $R/B = 7 \cdot 10^{-7}$.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из причин, ограничивающих широкое использование ядерных реакторов для энергетических целей, является их радиационная опасность. Необходимо создавать и использовать защиту от нейтронного и гамма-излучения реактора. Однако настоящую проблему могут создать возможные утечки из реактора образующихся в нем радиоактивных веществ. Наибольшей радиационной опасностью из этих веществ обладают делящиеся материалы и продукты их деления (ПД). В современных ядерных реакторах ядерное горючее заключено в герметичные оболочки. Конструктивно это зачастую стержни или пластины, носящие объединяющее название ТВЭЛ (тепловыделяющий элемент). Оболочка ТВЭЛА не препятствует передаче тепла от ядерного горючего к теплоносителю, а защищает от попадания в теплоноситель частиц ядерного горючего и ПД. При нарушении герметичности оболочек ТВЭлов контур циркуляции теплоносителя загрязняется аналогично. Полная очистка контура в этом случае практически невозможна, а ремонт загрязненной аппаратуры становится трудным, дорогостоящим и опасным.

С целью не допустить выход ПД ТВЭЛА в контур циркуляции теплоносителя существуют, совершенствуются и разрабатываются системы контроля герметичности оболочек (СКГО) ТВЭлов. Они призваны обнаружить нарушение целостности оболочек на ранней стадии развития повреждения с целью замены дефектного ТВЭЛА и предотвращения радиоактивного загрязнения контура с теплоносителем.

Считается, что в активной зоне нет ТВЭлов с дефектами оболочек, если активность теплоносителя обусловлена только поверхностным загрязнением ТВЭлов. Разгерметизация ТВЭлов характеризуется появлением микротрещин (газовая неплотность – первая степень разгерметизации), нераскрытых макротрещин (вторая степень). При нарушении герметичности ТВЭЛА накопившиеся под оболочкой продукты де-

ления выходят из ТВЭЛА. При раскрытии макротрещин и разрыве оболочки (соответственно третья и четвертая степени разгерметизации) продукты деления непосредственно попадают в теплоноситель.

Задачами контроля герметичности оболочек ТВЭлов на реакторных установках являются своевременное обнаружение повреждения оболочек ТВЭлов, предупреждение о повреждении и наблюдение за ними до замены дефектных элементов.

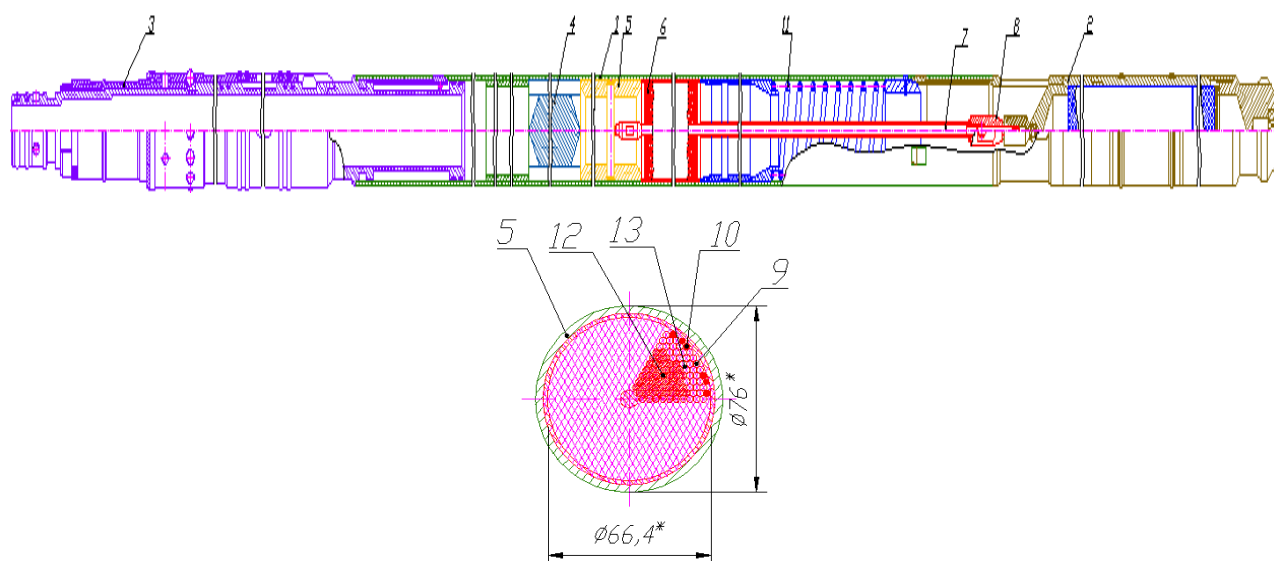
В связи с модернизацией исследовательского реактора ИВГ.1 (заменой газоохлаждаемых технологических каналов на водоохлаждаемые) в 1990 году была спроектирована и введена в опытную эксплуатацию система контроля герметичности оболочек ТВЭлов водоохлаждаемых технологических каналов реактора ИВГ.1М.

СКГО предназначена для:

- оперативного обнаружения ВОТК с негерметичными ТВЭлами, существенно влияющими на радиационную обстановку в технологических помещениях стенового комплекса;
- определения степени негерметичности ТВЭлов в ВОТК как характеристики выработки его ресурса, связанной со скоростью загрязнения водяного контура;
- выдачи рекомендации о ВОТК, подлежащих выгрузке из реактора;
- отработки оптимального метода контроля герметичности оболочек при длительной эксплуатации активной зоны.

ОПИСАНИЕ ВОТК НОУ

ВОТК-НОУ (рисунок 1) выполнен в виде цилиндрической капсулы со ступенчатой наружной поверхностью общей длиной 4990 мм и с внешним диаметром на уровне активной зоны, равным 76 мм, с максимальным диаметром, равным 82 мм (в районе шарикового замка) и с минимальным диаметром (в районе нижнего торца ВОТК), равным 44 мм.



1 - корпус; 2 - головка канала; 3 - хвостовик; 4 - тепловыделяющая сборка; 5 - обойма; 6 - торцевая решетка; 7 - стержень; 8 - наконечник; 9 - ТВЭЛ; 10 - наполнитель; 11 - кольцо пружинное; 12 - ТВЭЛ центральной зоны; 13 - ТВЭЛ периферийной зоны.

Рисунок 1. Конструктивная схема ВОТК-НОУ

Для охлаждения конструктивных элементов реактора, а также в качестве теплоносителя в ВОТК-НОУ применяется вода. Вода из реактора через окна направляющей головки 2 поступает в ВОТК-НОУ, проходит ТВС 4, омывает пробку 22 биозащиты, проходит хвостовик 3 и через торец ВОТК-НОУ выходит в узел отвода воды.

Топливная зона канала набирается из спирально-стержневых двухлопастного профиля ТВЭЛОВ (поперечное сечение $2,8 \times 1,5$ мм) с шагом закрутки лопасти 30 мм. Для ВОТК-НОУ первого и второго ряда топливная зона по высоте составляет 800 мм, количество ТВЭЛОВ в пакете составляет 468 шт. Для ВОТК-НОУ третьего ряда топливная зона по высоте составляет 600 мм, количество ТВЭЛОВ в пакете составляет 468 шт.

Материал сердечника ТВЭЛА – U-Zr с обогащением 19,75 % по урану-235. Сердечник ТВЭЛА заключён в оболочку толщиной 0,25 мм из сплава Э110. Для дистанционирования ТВЭЛОВ используется 24 заполнителя из сплава Э110 диаметром 1,6 и 2,2 мм.

Для испытаний в составе существующей активной зоны (АЗ) реактора установлены два опытных (экспериментальных) ВОТК-НОУ, в первый ряд АЗ – с ТВС длиной 800 мм, в третий ряд АЗ – с ТВС длиной 600 мм (см. рисунок 2).

Отбор проб теплоносителя проводился из четырех выбранных ВОТК № 14, 18, 22 и 24 с помощью открытия ручного запорного крана на спектрометрических барабанах, где № 14, 24 это ВОТК-НОУ, а № 18, 22 это штатные ВОТК. Первый ВОТК-НОУ № 14 с высотой ТВС 600 мм расположен в ячейке третьего ряда реактора. Второй ВОТК-НОУ № 24 с высотой ТВС 800 мм расположен в ячейке первого ряда.

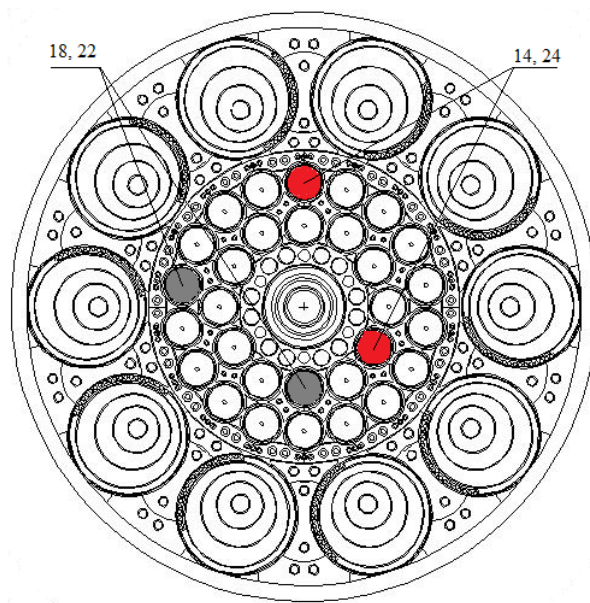


Рисунок 2. Расположение штатных ВОТК (каналы 18, 22) и ВОТК-НОУ (каналы 14, 24) в АЗ реактора ИВГ.1М

ФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Условия и порядок проведения эксперимента

С целью определения активности отдельных ПД в теплоносителе проводился отбор проб на СКГО с последующими измерениями спектров излучения радиоизотопов, содержащихся в пробах. Отбор проб теплоносителя проводился в спектрометрические емкости.

Методика отбора проб заключалась в следующем: первоначально пробы теплоносителя отбирались в емкости объемом 1,0 литр, а затем разливались в ем-

кости для измерений, объемом 0,5 л. На каждом пуске было проведено два пробоотбора – в начале пуска (через 15–20 мин после выхода на стационарный уровень мощности) и перед завершением пуска (приблизительно через 2 ч после выхода на стационарный уровень мощности). Спектр излучения каждой из восьми емкостей измерялся дважды. Время выдержки перед измерением составляло от 20 минут (для первого измерения) до 1,5 часов (для второго измерения). Время экспозиции для первого измерения составляло 200 с, для второго – 500 с. С целью определения активности отдельных ПД в теплоносителе был проведен отбор проб на СКГО и измерения спектров проб теплоносителя. Отбор проб теплоносителя проводился из 14, 18, 22 и 24 каналов с помощью открытия ручного запорного крана на спектрометрических емкостях.

Активность отдельных нуклидов в пробах теплоносителя определяется с помощью гамма-спектрометра InSpector 2000 с полупроводниковым гамма-детектором GC1020 (ППД), размещенного в свинцовом домике [1, 2]. В результате ранее проведенных исследований состава ПД в теплоносителе штатных ВОТК были определены следующие реперные изотопы ПД: ^{85}Kr , ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{89}Rb , ^{92}Sr , ^{104}Tc , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I , ^{138}Xe , ^{138}Cs и др.

Таблица 1. Ориентировочное время отбора проб

№ пробоотбора	№ канала			
	14	18	22	24
1	10:51:25	10:51:05	10:50:26	10:50:10
2	12:42:39	12:42:21	12:40:55	12:40:33

Измерения спектров теплоносителя проводятся непосредственно при работе реактора на стационарном уровне мощности.

Значения удельной активности A_0 продуктов активации (ПА) в теплоносителе на момент выхода из ВОТК рассчитаны по формуле:

$$A_0 = \frac{\sum_{i=1}^n A_i(t_i) \cdot \exp(\lambda t_i)}{n}, \quad (1)$$

где $A_i(t_i)$ – удельная активность ПА на момент измерения, Бк/л; λ – постоянная распада, с^{-1} ; t_i – время, прошедшее с момента выхода теплоносителя из активной зоны до начала времени измерения активности теплоносителя, с; n – количество измерений пробы теплоносителя, $n = 2$.

Степень герметичности ТВЭЛОВ характеризуется выходом ПД, определяемым как отношение скорости выхода ПД в теплоноситель R (Release) к скорости его рождения B (Born). Под скоростью рождения B измеряемого нуклида подразумевается суммарная

скорость рождения данного нуклида и его предшественников в цепочке образования по формуле:

$$B = P_c \cdot 3,2 \cdot 10^{13} \eta, \quad (2)$$

где P_c – мощность ВОТК, кВт; η – выход данного нуклида и его предшественников на одно деление ^{235}U , ядро/дел.; $3,2 \cdot 10^{13}$ – количество делений ^{235}U , приводящих к выделению 1 кДж.

Скорость выхода R определяется (3) как количество ядер измеряемого нуклида и его предшественников, выходящих из ТВС в теплоноситель в единицу времени. Скорость выхода измеряемого нуклида в теплоноситель определяется по результатам измерения его активности в теплоносителе $A(t)$ гамма-спектрометрическим методом:

$$R = \frac{A(t_1) \cdot Q_c \cdot 10^{-3}}{\rho \cdot \lambda \cdot F}, \quad (3)$$

где $A(t_1)$ – удельная активность ПД во время измерения, Бк/л; Q_c – расход теплоносителя через ВОТК, г/с; ρ – плотность теплоносителя, г/см³, $\rho = 1$ г/см³; λ – постоянная распада измеряемого нуклида, с^{-1} ; F – поправка на распад от момента отбора пробы до момента ее измерения t_1 (при меньшем периоде распада предшественников, $F = \exp(\lambda \cdot t_1)$, отн. ед).

Таким образом, относительный выход ПД в теплоноситель (R/B) определяется как:

$$R/B = \frac{A(t) \cdot Q_c \cdot 10^{-16}}{P_c \cdot 3,2 \cdot \eta \cdot \rho \cdot \lambda \cdot F}. \quad (4)$$

Результаты исследований выхода ПД представлены в виде временной зависимости выхода отдельных ПД (^{92}Sr , ^{131}Te , ^{138}Cs), а также среднего значения $\bar{R}/B$ для всех зарегистрированных ПД. $\bar{R}/B$ здесь представляет собой среднее арифметическое значение выхода ПД по двум отборам проб.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты исследований по проведенным экспериментам приведены ниже в графическом виде. На рисунке 3 представлены результаты средних значений выхода ПД на пусках реактора ИВГ.1М П-17-05 ... П-19-12. На рисунках 4, 5 и 6 – средние значения выхода в теплоноситель ^{92}Sr , ^{131}Te и ^{138}Xe , соответственно.

Следует обратить внимание, что на пуске П-18-11 наблюдался увеличенный выход не только ^{138}Xe , но и $^{85\text{m}}\text{Kr}$, ^{87}Kr , ^{88}Kr для первого пробоотбора. Это вероятно связано с тем, что в отличие от других пусков, первая проба была отобрана несколько раньше – через 8 минут после вывода реактора на стационарный уровень мощности. Для второго пробоотбора выход радиоактивных благородных газов стабилизировался на уровне среднестатистических значений.

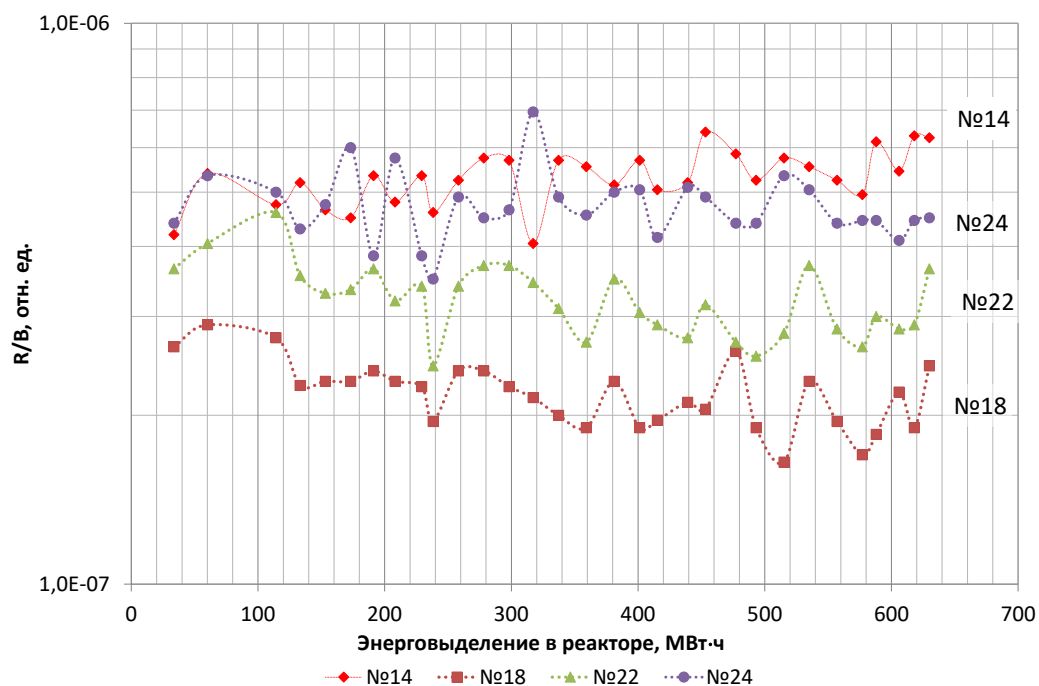


Рисунок 3. Средние значения выхода ПД на пусках реактора ИВГ.1М П-17-05 ... П-19-12 для энерговыделения в реакторе до 630 МВт/час

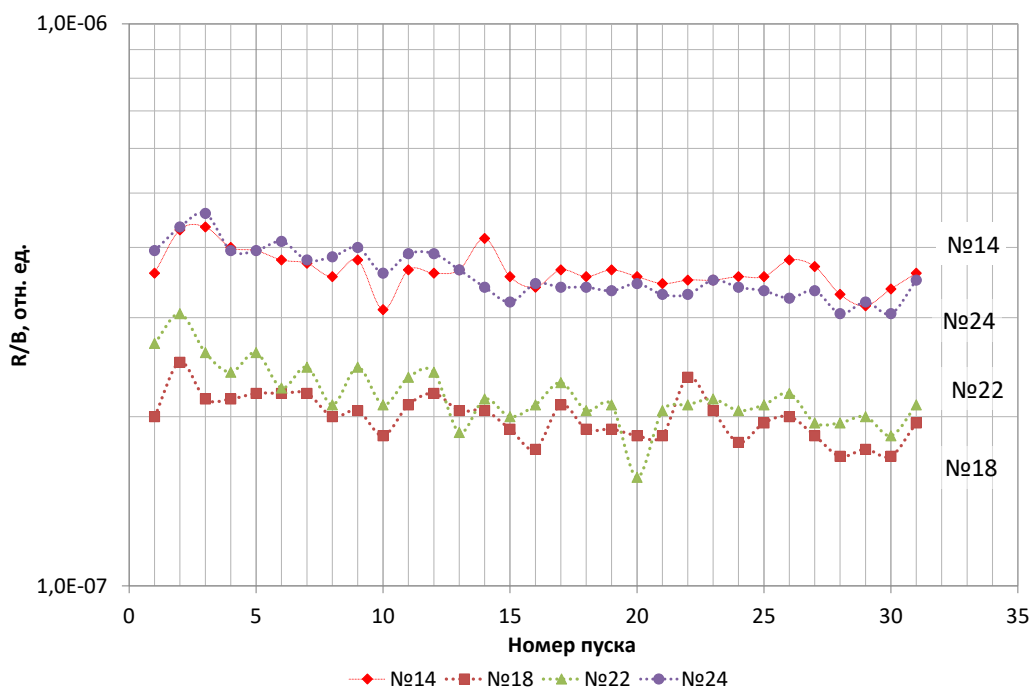
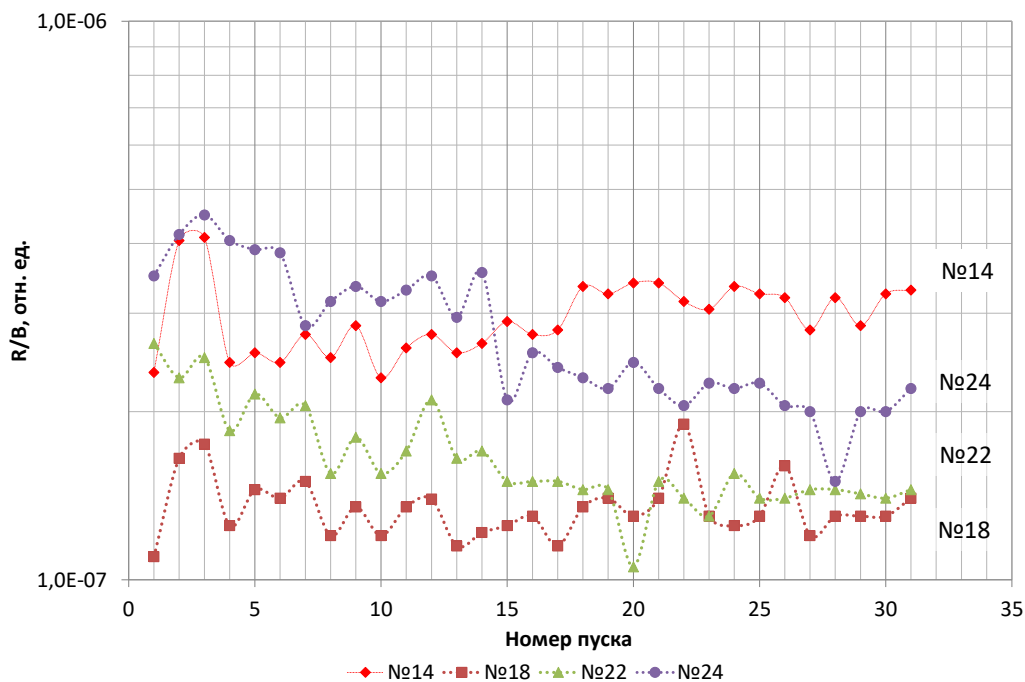
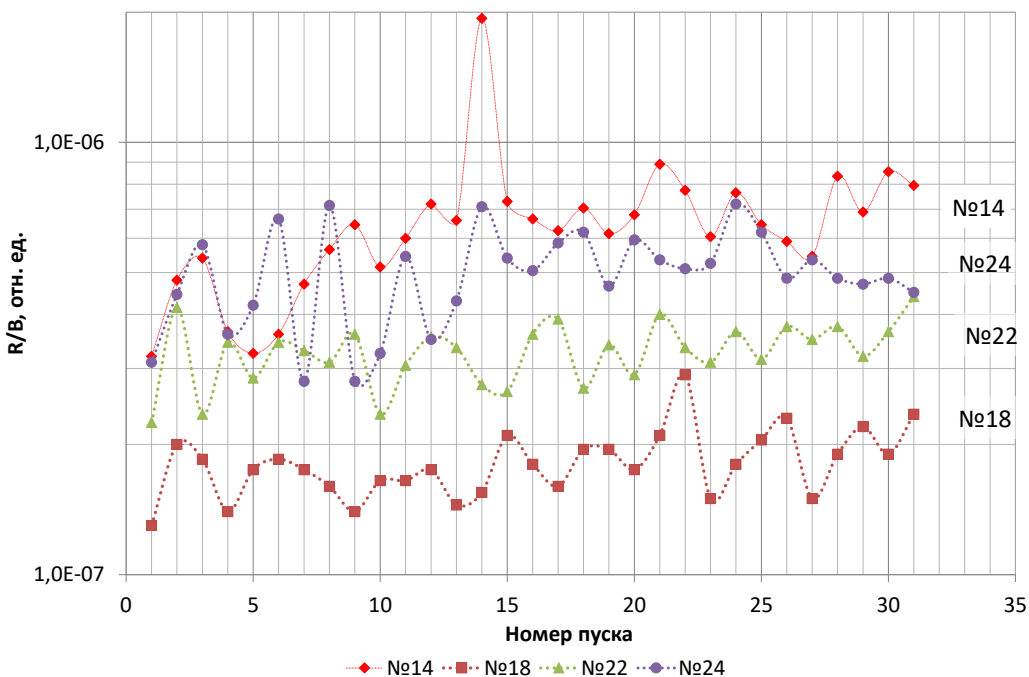


Рисунок 4. Значения выхода ^{92}Sr на пусках реактора ИВГ.1М П-17-05 ... П-19-12

Рисунок 5. Значения выхода ^{131}Te на пусках реактора ИВГ.1М П-17-05 ... П-19-12Рисунок 6. Значения выхода ^{138}Xe на пусках П-17-05 ... П-19-12 реактора ИВГ.1М

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В ходе исследования выхода ПД на каждом из пусков П-17-05 ... П-18-19 реактора ИВГ.1М был выполнен забор двух партии проб. Первая партия из четырех проб отбиралась по прошествии приблизительно 15 минут после выхода реактора на стационарный уровень мощности 6 МВт. Вторая партия из

четырёх проб отбиралась через 2 часа после выхода реактора на стационарный уровень мощности.

Средний выход зарегистрированных ПД изобарных цепочек из экспериментальных ВОТК-НОУ № 14, 24, составил $R/B = 5 \cdot 10^{-7}$. Выход ПД отдельных цепочек с массовыми номерами 85, 87, 88 (^{85m}Kr , ^{87}Kr , ^{88}Kr) составил до $R/B = 10^{-6}$. Аналогичные значения

для штатных ВОТК составили: средний выход ПД $R/B = 2,8 \cdot 10^{-7}$, выход ПД отдельных цепочек с массовыми номерами 85, 87, 88 (^{85}mKr , ^{87}Kr , ^{88}Kr) R/B до 10^{-6} .

Полученные средние значения выходов ПД позволяют сделать вывод о том, что выход ПД из экспериментальных ВОТК-НОУ превышает выход ПД из штатных ВОТК № 18, 22 для зарегистрированных ПД приблизительно в 2 раза.

Проведен расчет выходов ПД для экспериментальных ВОТК-НОУ. Расчетный выход ПД для ВОТК-НОУ с герметичными твэлами составил $R/B = 7 \cdot 10^{-7}$. Выход ПД в теплоноситель в расчете определяется преимущественно загрязненностью поверхности оболочки твэлов.

Анализ изменения выхода ПД как из экспериментальных ВОТК-НОУ, так и из штатных ВОТК в рассмотренном диапазоне энерговыделения в реакторе до 415 МВт·час показывает, что выход ПД остается неизменным в пределах флуктуаций.

Таким образом, выход ПД из экспериментальных ВОТК-НОУ № 14, 24 отдельных изобарных цепочек с массовым номером 85, 87, 88 равный приблизительно $R/B = 10^{-6}$, выход ПД цепочек с массовым номером 92, 131 до $R/B = 5 \cdot 10^{-7}$ и средний выход зарегистрированных ПД изобарных цепочек до $R/B = 5 \cdot 10^{-7}$ может считаться допустимым по сравнению с расчетным выходом для герметичных твэлов $R/B = 7 \cdot 10^{-7}$ [3–5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Germanium Detectors. User's manual. Canberra Industries, Inc. 2013.
2. Спектрометрическая система GENIE 2000. Версия 2.1. Canberra Industries, Inc., 2002.
3. Разработка расчетного кода для моделирования термомеханического поведения твэлов, распухания твэлов, выход активности из негерметичных твэлов. Техническая справка. Инв.№ 10/НИР-7036. Москва, Троицк, 2015, 135 с.
4. С.С. Ломакин. Ядерно-физические методы диагностики и контроля активных зон реакторов АЭС. М., Энергоатомиздат, 1986.
5. М.Л. Жемжуров, В.А. Левадный. Гамма-спектрометрический метод непрерывного контроля примесей в теплоносителе реакторного контура. Атомная энергия, т.70, вып. 3, март 1991.

ИВГ.1М РЕАКТОРЫНЫҢ ЖЫЛУ ТАСЫМАЛДАҒЫШЫНДАҒЫ ЭКСПЕРИМЕНТТІК ССТА ТБУ ТВЭЛДЕРІНЕН БӨЛІНГІШ ӨНІМДЕРДІҢ ШЫҒЫМДЫЛЫҒЫН БАҒАЛАУ

Б.С. Медетбеков, Ю.А. Попов, Д.В. Жмук

ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Осы жұмыс IVG.1М реакторындағы жылу асымалдағыштың белсенділігін бағалауға және сынама гамма-спектрометриялық әдісімен төмен байытылған уран (ТБУ) бар эксперименттік су-салқындатылған технологиялық арналардың (ССТА) жанармай твэлдердің бөлінгіш өнімдердің (БӨ) шығымдылығын бағалауға арналған. Мақалада гамма-спектрометриялық әдіс көмегімен IVG.1М реакторындағы салқындатқышта БӨ шығымдылығын анықтау үшін екі эксперименталды ССТА-ТБУ зерттеуінің нәтижелері келтірілген. Реактордағы 630 МВт·сағ дейінгі электр энергиясын шығаратын диапазондағы эксперименталдық ССТА-ТБУ және тұрақты ССТА -дан БӨ шығуының өзгеруін салыстырмалы талдау ұсынылды. Зерттеу нәтижелері 30-дан астам реакторлық эксперимент жүргізген кезде БӨ-нің кірістілігінің ауытқулар кезінде өзгермейтіндігін көрсетеді. Баяндамада $R/B = 5 \cdot 10^{-7}$ -ге дейін тіркелген барлық БӨ-лердің орташаланған эксперименттік ССТА-ТБУ -дан алынған БӨ өнімділігі $R/B = 7 \cdot 10^{-7}$ тығыздалған отын шыбықтары үшін есептелген кірістілікпен салыстырғанда қолайлы деп санауға болады.

Выводы

В результате исследований были определены активности ПД в теплоносителе на момент выхода теплоносителя из ВОТК. Был определен усредненный (по зарегистрированным ПД) выход ПД R/B .

Выход ПД из твэлов экспериментальных ВОТК-НОУ № 14, 24 превышает выход ПД из штатных ВОТК № 18, 22 приблизительно в 2 раза и составляет $R/B = 10^{-6}$ для ПД цепочек с массовым номером 85, 87, 88 (^{85}mKr , ^{87}Kr , ^{88}Kr) и до $R/B = 5 \cdot 10^{-7}$ для ПД отдельных цепочек с массовым номером 92, 131 (^{92}Sr , ^{131}Te).

Выход ПД отдельных изобарных цепочек с массовыми номерами 85, 87, 88 равный приблизительно $R/B = \sim 10^{-6}$ и средний выход зарегистрированных ПД изобарных цепочек до $R/B = 5 \cdot 10^{-7}$ может считаться допустимым по сравнению с расчетным выходом для герметичных твэлов ($R/B = 7 \cdot 10^{-7}$).

Проведенные исследования важны для понимания процессов, происходящих в реакторе ИВГ.1М при использовании экспериментальных ВОТК. На данный момент это является единственным возможным способом контролировать герметичность оболочек твэлов и определять соответствие экспериментальных каналов предъявляемым техническим требованиям. Данные исследования помогут принять решение об изготовлении партии штатных каналов и комплектации ими активной зоны реактора ИВГ.1М новым топливом с низким обогащением.

**EVALUATION OF FISSION PRODUCT REALESE FROM THE FUEL RODS OF EXPERIMENTAL
WATER-COOLED TECHNOLOGICAL CHANNELS INTO THE COOLANT OF THE IVG.1M REACTOR**

B.S. Medetbekov, Yu.A. Popov, D.V. Zhmuk

Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

This paper is devoted to evaluation of activity of the IVG.1M reactor coolant and estimation of the fission products (FP) yield from the fuel rods of experimental water-cooled technological channels with low enriched uranium (WCTC-LEU) using a sampling gamma spectrometric method. The article presents the results of studies of two experimental WCTC-LEU to determine the yield of FP into the coolant of the IVG.1M reactor using a sampling gamma spectrometric method. A comparative analysis of changes in the FP yield from both experimental WCTC-LEU and regular WCTC is presented in the considered range of energy release in the reactor up to 630 MW·hour. Research results show that the FP yield remains unchanged within fluctuations when conducting more than 30 reactor experiments. The paper shows that the FP yield from the experimental WCTC-LEU averaged over all registered FPs to $R/B = 5 \cdot 10^{-7}$ can be considered acceptable compared to the calculated yield for sealed fuel rods $R / B = 7 \cdot 10^{-7}$.