

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

А. И. АЛИХАНОВ, А. А. БОЧВАР, А. П. ВИНОГРАДОВ, Н. А. ВЛАСОВ (зам. главного редактора), И. Н. ГОЛОВИН, Н. А. ДОЛЛЕЖАЛЬ, А. П. ЗЕФИРОВ, В. Ф. КАЛИНИН, Н. А. КОЛОКОЛЬЦОВ (зам. главного редактора), А. К. КРАСИН, А. И. ЛЕЙПУНСКИЙ, В. В. МАТВЕЕВ, М. Г. МЕЩЕРЯКОВ, М. Д. МИЛЛИОНЩИКОВ (главный редактор), П. Н. ПАЛЕЙ, Д. Л. СИМОНЕНКО, В. И. СМЕРНОВ, В. С. ФУРСОВ, В. Б. ШЕВЧЕНКО.

СОДЕРЖАНИЕ

СТАТЬИ

- В. И. Баранов. Развитие радиогеологии в СССР . . . 419
- Я. Богач, П. Квиттнер, Э. Сабо. Определение некоторых примесей в кремнии высокой чистоты методом активационного анализа без разрушения образцов 421
- Я. Божик, Е. Кубовский, С. Лягак. Измерение материального параметра критической сборки «Анна» 425
- Н. Г. Ваданина, Ю. П. Сайков. Критерий сравнения состояния твэлов активной зоны реактора 429
- Ю. В. Чушкин, Е. Ф. Давыдов, В. Н. Сюзьв, Т. М. Гусева, В. В. Колесов, М. Д. Дерибизов. Радиационная стойкость пластинчатых твэлов реактора СМ-2 432
- Б. Г. Егызаров, В. А. Зюбка, А. И. Новиков. Выбор оптимальной аналитической методики при инструментальном активационном анализе 435
- В. И. Субботин, Д. М. Овечкин, Д. Н. Сорокин, А. П. Кудрявцев. Теплоотдача при кипении натрия в условиях свободной конвекции 437
- В. П. Бобков, М. Х. Ибрагимов, В. И. Субботин. Расчет коэффициента турбулентного переноса тепла при течении жидкости в трубе 442
- В. Я. Кудяков, М. В. Смирнов, Н. Я. Чукреев, Ю. В. Посохин. Образование двухвалентного тория в среде расплавленного хлористого калия 448
- Н. М. Зуева, Л. С. Соловьев. Равновесие и устойчивость плазмы в аксиально симметричных тороидальных системах 453

ПЕРСОНАЛИЯ

Исаак Константинович Кикоин (к 60-летию со дня рождения) 460

АННОТАЦИИ ДЕПОНИРОВАННЫХ СТАТЕЙ

Н. Е. Врежнева, Ю. И. Капшанинов, С. Н. Озипанер. Изучение кинетики электролитического выделения гидроокисных осадков редкоземельных элементов 462

- А. С. Тшечкин. Вычислительное устройство для обработки γ -спектров 462
- В. Е. Дроздов, Ю. С. Рябухин. К расчету мощностей поглощенных доз полового цилиндрического облучателя с неравномерным распределением активности 463
- М. Задубан, Л. Медвидь. Определение суммарной β -активности долгоживущих продуктов деления при помощи K^{40} 464
- Г. П. Березина, Я. Б. Файнберг, А. К. Березин. Экспериментальное исследование потоков быстрых ионов, образующихся в системе пучок — плазма 465

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

- М. А. Сарычев, Ю. Н. Алексеенко, Н. В. Звонов, В. И. Буйницкая, И. В. Рогожкин, А. А. Баталов, Ю. В. Александров. Распределение потока тепловых нейтронов в различных отражателях с каналами 467
- Т. М. Гусева, Е. Ф. Давыдов, В. Н. Сюзьв, Ю. В. Чушкин. О возможном характере изменения объема тепловыделяющих композиций при твердом распухании 469
- Е. М. Лобанов, Н. В. Зиновьев. Определение необходимой статистики при бескорреляционной расшифровке данных активационного анализа 471
- С. Н. Вотвинов, Т. М. Гусева, В. И. Клименков. О радиационной стойкости сплава циркония с 1% ниобия в условиях работы реактора СМ-2 473
- А. Э. Шемьл-заде. О сухих выпадениях продуктов ядерных испытаний 474
- К. П. Захарова, Г. М. Иванов, В. В. Куличенко, Н. В. Крылова, Ю. В. Сорокин, М. И. Федорова. Об использовании тепла химических реакций для термической переработки жидких радиоактивных отходов 475

225381/м



Измерение материального параметра критической сборки «Анна»

Я. ВОУЖИК, Е. КУВОВСКИЙ, С. ЛЯТЭК

(Институт ядерных исследований, Сверк, ПНР)

УДК 621.039.519.24

Конструкция активной зоны критической сборки «Анна» описана в работах [1, 2]. Объемные доли материалов активной зоны следующие: графит — 0,7746; вода — 0,1156; алюминий — 0,1010; UO_2 — 0,0088. Графитовая кладка имеет диаметр 270 см и высоту 240 см.

Квадратная решетка дает возможность разместить 45 твэлов с шагом 140 мм. Незанятые твэлами отверстия решетки заполняются графитовыми пробками. Таким образом, активная зона независимо от загрузки окружена однородным боковым графитовым отражателем. Торцовые отражатели неоднородны и состоят из графита и воды. Объемные доли этих материалов те же, что и для активной зоны.

Первые критические эксперименты [1], проведенные на критической сборке для установления макроскопических параметров исследуемой активной зоны, выявили некоторые трудности. Они связаны главным образом с измерением материального параметра системы. Суть затруднений сводилась к следующему. Минимальная критическая загрузка составляла около 12 твэлов, расположенных в прямоугольной решетке 3×4 . Следовательно, оценка радиального геометрического параметра на основе только трех или четырех экспериментальных точек радиальной плотности потока была невозможной. Приведенные в работе [1] величины вертикального геометрического параметра и осевой добавки отражателя, вероятно, имели большие погрешности.

Методика измерений

Для измерения материального параметра была выбрана методика так называемой надкритической надстройки реактора по высоте [3, 4].

Применение ее явилось следствием поисков при постановке экспериментов, с помощью которых можно было бы более точно определить макроскопические параметры. Однако, поскольку исходной предпосылкой данных экспериментов явилась простейшая теоретическая модель, принятая методика также не исключала, к сожалению, возникновения систематических ошибок. Следует отметить, что эта

методика применяется впервые к столь сложной, многозонной, сильно неоднородной реакторной системе, какой является критическая сборка «Анна». Успех эксперимента зависел от возможности подбора таких условий, при которых отклонения от принятой методики были бы минимальными. Она состоит в следующем.

Эффективный коэффициент размножения системы можно записать в виде

$$k_{\text{эфф}} = k_{\infty} p(B^2), \quad (1)$$

где k_{∞} — коэффициент размножения для бесконечной среды; $p(B^2)$ — вероятность избежать утечки для нейтронов в системе конечных размеров.

Если осевую составляющую геометрического параметра представить в виде

$$B_z^2 = \left(\frac{\pi}{H + \lambda_z} \right)^2, \quad (2)$$

то, изменяя высоту реактора, получим

$$\frac{\partial B_z^2}{\partial H} = - \frac{2\pi^2}{(H_K + \lambda_z)^3}, \quad (3)$$

где H_K — критическая высота реактора; λ_z — осевая добавка отражателя.

Выражая запас реактивности в виде соотношения

$$\rho = 1 - \frac{1}{k_{\text{эфф}}}, \quad (4)$$

с учетом (1) и (3) и после несложных преобразований получаем дифференциальную реактивность

$$\frac{\partial \rho}{\partial H} = \frac{2\pi^2}{k_{\infty} (H_K + \lambda_z)^3} \cdot \frac{\partial p^{-1}(B^2)}{\partial B_z^2}. \quad (5)$$

Обозначим величину

$$\frac{2\pi^2}{k_{\infty}} \cdot \frac{\partial p^{-1}(B^2)}{\partial B_z^2} = C. \quad (6)$$

Тогда

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial H} \right)^{-1/3} = C^{-1/3} (H_K + \lambda_z). \quad (7)$$

Таким образом, разгружая реактор по радиусу и достраивая его по высоте, можно получить достаточное количество критических систем с разными радиусами R и критическими высотами H_K . Для каждой критической системы проводятся измерения дифференци-

альной реактивности. Экстраполяция функции $\left(\frac{\partial \rho}{\partial H}\right)^{-1/3} = f(H_K + \lambda_z)$ к значению $\left(\frac{\partial \rho}{\partial H}\right)^{-1/3} = 0$ дает возможность определить аксиальную добавку отражателя λ_z .

В случае реактора цилиндрической формы геометрический параметр имеет вид

$$B_g^2 = \left(\frac{2,405}{R + \lambda_r}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{H_K + \lambda_z}\right)^2. \quad (8)$$

Так как в критическом состоянии материальный параметр B_m^2 равен геометрическому параметру B_g^2 , задача сводится к подбору величины B_g^2 и радиальной добавки отражателя λ_r . Имея в виду нелинейность функции (8) по отношению к параметрам B_g^2 и λ_r , для их нахождения использовали обобщенную методику наименьших квадратов, включая процесс подбора B_g^2 и λ_r методом последовательных приближений [5, 6]. По этой методике проводилась линеаризация функции (8) в окрестности $(\epsilon_B, \epsilon_\lambda)$ некоторой произвольно выбранной точки (B_0^2, λ_{r0}) и накладывалось условие минимума отклонений сужающейся постепенно окрестности $(\epsilon_B, \epsilon_\lambda)$ до достижения определенного заданного радиуса сходимости δ .

Описание эксперимента

Физическая суть эксперимента — дифференциальное изменение по высоте геометрического параметра реактора — была обусловлена способом загрузки критической сборки «Анна» и необходимостью проведения на ней критических опытов.

Загрузка реактора (подвешивание твэлов в сборке) проводилась так, чтобы достичь критического состояния без верхнего отражателя. На рис. 1 изображена активная зона сборки и расположение одного твэла в графитовом блоке.

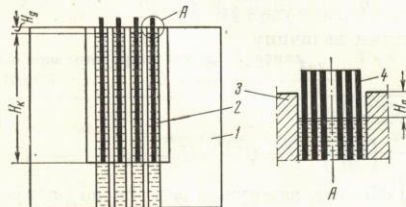


Рис. 1. Вид активной зоны:

А — расположение одного твэла в графитовом блоке; 1 — отражатель; 2 — технологический канал с твэлом; 3 — графит; 4 — твэл; H_K — критический уровень воды; H_g — толщина сухой части графитовой решетки.

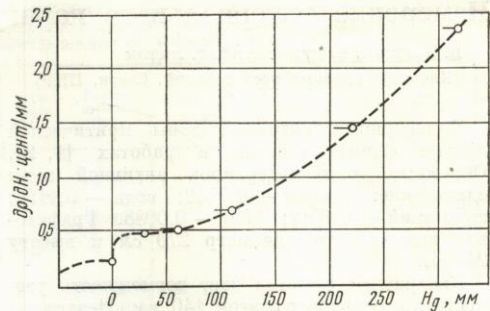


Рис. 2. Зависимость $\frac{d\rho}{dH} = f(H_g)$.

Способ измерения определялся четко выраженной неоднородностью замедлителя (графит — вода).

Изменение высоты критической сборки могло быть достигнуто лишь путем изменения уровня воды. Поэтому необходимо было найти вблизи края графита область, достаточную для измерения дифференциальной реактивности. В этой области, с одной стороны, повышение уровня воды в технологических каналах должно быть приблизительно равнозначно повышению всей высоты реактора, а с другой — влияние сухого уран-графитового слоя, находящегося над критическим уровнем воды, должно быть пренебрежимо малым. На практике все твэлы подвешивались в активной зоне на такой высоте, чтобы критический уровень воды в технологических каналах всегда был ниже верхней поверхности графитовой кладки примерно на 10 мм. Такой запас был необходим для измерения дифференциальной реактивности и одновременно, как следует из специальных исследований, не очень сильно влиял на результаты измерений. На рис. 2 приведены величины $d\rho/dH$, измеренные в активной зоне, состоящей из 13 твэлов, в зависимости от высоты H_g графитового замедлителя, находящегося над критическим уровнем воды. Экспериментальные точки указывают также положение, начиная с которого повышался уровень воды. Таким образом, наклон $d\rho/dH$ для каждой точки рис. 2 распространен на область порядка 10 мм. Из рис. 2 видно, что в пределах 0—30 мм высоты графита можно найти область, в которой $d\rho/dH$ изменяется слабо. Это означает, что описанный выше эффект оказывал незначительное влияние на результаты измерений.

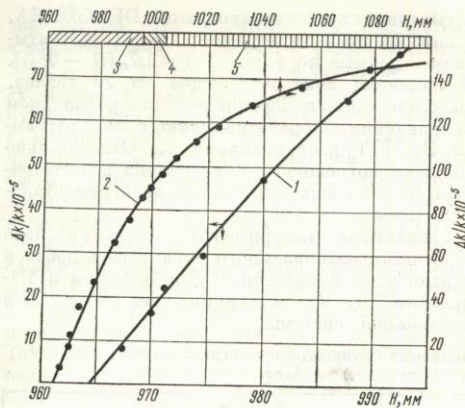


Рис. 3. Зависимость $\rho = f(H)$:
 1 — в третьей области; 2 — в третьей, четвертой и пятой областях; 3 — область, в которой твэл окружен графито-водным замедлителем; 4 — область, в которой твэл окружен только водным замедлителем; 5 — область над твэлом, занятая столбом воды.

По условиям безопасности критические эксперименты проводились в следующем порядке. Твэлы загружались в сухие технологические каналы, размещенные в решетке. Критичность достигалась путем медленного повышения уровня воды в технологических каналах. В критическом состоянии все стержни аварийной защиты и регулирования находились над уровнем графита. Регулирование осуществлялось путем изменения уровня воды при помощи подвижного сосуда.

Система была оборудована автоматически сбрасывающим клапаном, позволяющим быстро удалить воду из технологических каналов.

Уровни воды измерялись двумя уровнемерами. Один предназначался для измерения «абсолютного уровня» с точностью ± 2 мм, другой — прецизионный — служил для определения прироста уровня воды с точностью $\pm 0,02$ мм путем электрического контакта с поверхностью воды.

Реактивность ρ рассчитывалась на основе измерений установившегося периода реактора. Для иллюстрации на рис. 3 показана функция $\rho = f(H)$ для одной из конфигураций активной зоны, состоящей из 13 твэлов. Виден линейный участок, достаточный для определения величины $\partial\rho/\partial H$. Он показан для ясности в увеличенном масштабе (кривая 1). Вблизи поверхности соприкосновения графита с воздухом

величина $\partial\rho/\partial H$ уменьшается, что выражается искривлением прямолинейного участка (скачок вблизи $H_g = 0$ на рис. 2). Выше активной части твэла начинает сказываться эффект отражения столбов воды (ход кривой 2 на рис. 3). Изучение кривой 2 позволяет сделать некоторые выводы о взаимоотношениях замедлителей: воды и графита в активной зоне критической сборки. Вода в активной зоне составляет более 70% замедляющей способности всего замедлителя.

Однако, как следует из рис. 3, отражающие свойства столбов воды проявляются на расстоянии порядка 10 см над активной зоной. Таким образом, в активной зоне с полным верхним торцовым отражателем, начиная с определенной высоты, столбы воды будут отравлять графитовый отражатель. Этот эффект был замечен ранее в работе [7].

Опыты по измерению $\partial\rho/\partial H$ были проведены для семи критических уровней, соответствующих различным загрузкам. Конфигурации активной зоны, показанные на рис. 4, выбирались по возможности близкими к цилиндрической геометрии. Критический уровень $H_k = 605$ мм определялся наличием в нашем распоряжении ограниченного числа твэлов — 29. Измеренные функции приведены на рис. 5. Экспериментальные точки с хорошей точностью укладываются на прямую. Все экспериментальные данные обрабатывались на быстродействующей электронной счетной машине GIER. Разработанная программа DERODENA содержит систему подпрограмм на языке АЛГОЛ-60, с помощью которых по обобщенной методике наименьших квадратов обрабатываются экспериментальные данные и оценивается по-

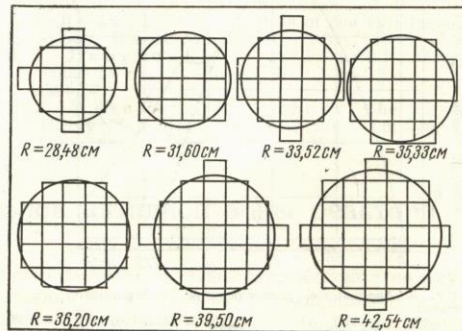


Рис. 4. Конфигурации активной зоны.

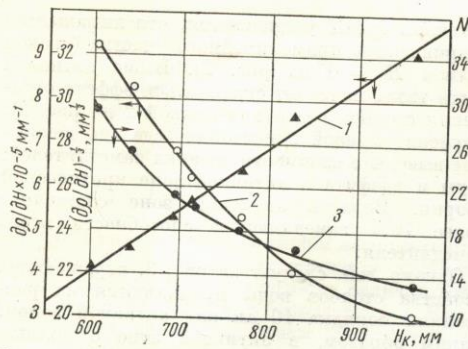


Рис. 5. Экспериментальные характеристики:
 1 — $(\frac{\partial \rho}{\partial H})^{-1/3} = f(H_k)$; 2 — $\frac{\partial \rho}{\partial H} = f(H_k)$; 3 — зависимость числа твэлов от критического уровня $N = f(H_k)$.

грешность измеренных величин. В качестве дополнения DERODENA содержит также подпрограммы COSFIT и BESFIT, которые использовались для обработки данных аксиального и радиального распределения нейтронных потоков. В результате нами были получены значения B_m^2 , λ_r , λ_z , приведенные в таблице.

Для проверки величины аксиальной добавки λ_z было измерено распределение потока в вертикальном направлении по активации медной проволоки. Активация проводилась в центре активной зоны, состоящей из 13 твэлов. Это распределение представлено на рис. 6. Экспериментальные точки, находящиеся в асимптотической области, характеризующейся отрезком вдоль оси, равным ~80%, обра-

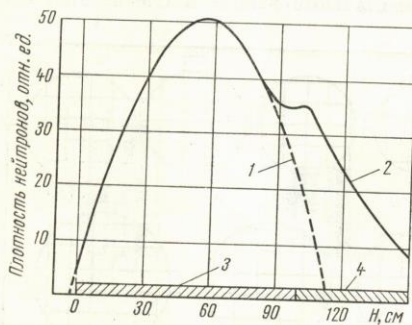


Рис. 6 Аксиальное распределение нейтронного потока:
 1 — расчет по формуле $\cos 2,66 \cdot 10^{-2} (H - 56,2)$; 2 — эксперимент; 3 — критическая высота активной зоны; 4 — нижний торцовый отражатель.

батывались с помощью программы DERODENA, в которой по подпрограмме COSFIT рассчитывались данные по формуле $\cos [B_z (H - H_0)]$. В активной зоне, состоящей из 29 твэлов, было проведено измерение потока в радиальном направлении. Обработка данных по программе BESFIT дает величину λ_r . Относительно большая погрешность обусловлена недостаточным (всего лишь 10) числом экспериментальных точек.

Результаты экспериментов можно сравнить с расчетом материального параметра и добавок отражателя, проведенным Домбровским и Малевским [8] по двухгрупповому методу для двухзонной системы.

Значение материального параметра и эффективных добавок отражателей

Параметр	Эксперимент		Расчет [8]
	$\partial \rho / \partial H$	Распределение потока	
$B_m^2, \text{см}^{-2}$	$(30,14 \pm 0,30) \cdot 10^{-4}$	—	$29,69 \cdot 10^{-4}$
$\lambda_r, \text{см}$	$22,00 \pm 0,46$	26 ± 3	21,0
$\lambda_z, \text{см}$	$17,12 \pm 0,53$	$18,04 \pm 0,65$	15,7

Приведенные в таблице расчетные и экспериментальные данные хорошо согласуются.

Обсуждение результатов

Проведенные измерения указывают на то, что методика так называемой надкритической достройки реактора может с успехом применяться даже в случае довольно сложных реакторных систем. Однако надо иметь в виду область ее применения в рамках принятых теоретических предпосылок. Уместно, например, отметить, что определение параметров B_m^2 , λ_z , λ_r основано на предпосылке о независимости радиальной и аксиальной добавок отражателя от размеров, геометрии активной зоны и энергии нейтронов. Следовательно, можно предполагать, что приведенные эффективные добавки отражателей являются некоторыми усредненными величинами.

Определение постоянной C в формуле (6) требует принятия определенной теоретической модели для выведения критического уравнения, наилучшим образом описывающего данную критическую систему. Принятие этой модели дает возможность в ходе описанного эксперимента получить некоторые другие параметры реактора. Например, на основании одногруппо-

вой модели для реактора без отражателя с эффективными размерами с учетом $p(B^2) = (1 + M^2 B^2)^{-1}$ по известной величине C сразу можно определить параметры k_∞ и M^2 . Существенные трудности заключаются, однако, в выборе самой модели. Упомянутая выше простейшая модель ввиду большой неоднородности, большого коэффициента k_∞ , сравнимости эффективных добавок отражателей с размерами активной зоны для решетки критической сборки «Анна» неприменима [9]. Поиски более сложной формы критического уравнения приводят к необходимости введения ряда поправочных коэффициентов и параметров, что, в свою очередь, еще больше осложняет анализ. Таким образом, в принятом критическом уравнении, по-видимому, не будет простой зависимости между параметрами k_∞ , B_m^2 , M^2 , а площадь миграции M^2 будет иметь иной физический смысл. Необходимо при этом отметить специфическую роль отражателя. Толщины радиального и нижнего торцового отражателей можно рассматривать как бесконечные, так как их минимальные размеры равнялись соответственно 93 и 144 см. С другой стороны, эффективность специфического верхнего торцового отражателя, состоящего из сухих твэлов, не была постоянной. Однако, принимая во внимание конструкцию твэлов и относительно большой шаг решетки, можно предполагать, что погрешности, связанные с этим эффектом, будут незначительны. По-видимому, из ряда факторов, влияющих на погрешность измерений параметров решетки, влияние отражателя является для нашей системы решающим. Если для реактора без отражателя утечка определяется размерами активной зоны B_g^2 и диффузионными свойствами среды M^2 , то введение любого отражателя увеличивает вероятность избежать утечки $p(B^2, M^2) = ap(B^2, M^2)$ без отр., $a > 1$. Это означает, что в одноручной модели при постоянном значении B_m^2 должна резко уменьшиться величина M^2 , которая будет теперь выражать диффузионные свойства активной зоны и отража-

теля и тем самым являться некоторой приведенной величиной. Из этого следует, что величина постоянной C в формуле (6) зависит в значительной степени от отражателя и выражается теперь как $C = \frac{M^2}{a} \cdot \frac{2\pi^2}{k_\infty}$. Измерения, проведенные для активной зоны с полным верхним торцовым графитовым отражателем $H_g = 70$ см и без него $H_g = 10$ мм, показывают, что дифференциальная реактивность системы без отражателя приблизительно в три раза меньше, чем дифференциальная реактивность системы с отражателем. Хотя в экспериментах с отражателем сухая часть решетки, находящаяся в графите, имела влияние на k_∞ , можно утверждать, что основным фактором, влияющим на величину дифференциальной реактивности, являлся отражатель. Всесторонняя оценка этого влияния требует более тщательных исследований на «голом» реакторе.

Поступила в Редакцию 8/VI 1967 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Arkuszewski et al. Symposium on Exponential and Critical Experiments. SM-42/61. Amsterdam, 2-6 Sept. 1963.
2. W. Dabek, J. Kubowski. Nukleonika, 11, Nr. 4, 213 (1966).
3. Г. Я. Андрианов и др. Симпозиум по экспоненциальным и критическим экспериментам. SM-42/89. Амстердам, 2-6 сентября 1963.
4. K. Kobayashi et al. J. Nucl. Sci. and Technology, 2 (7), 257 (1965).
5. Ю. В. Линник. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. М., Физматгиз, 1962.
6. W. Edwards Deming. Statistical Adjustment of Data. N.Y., Dover Publications, Inc., 1964.
7. J. Bouzyk et al. Institute of Nuclear Research, Swierk, Report Nr. 600/IX-A/PR, 1965.
8. C. Dabrowski, S. Malewski. Instytut Badań Jadrowych, Swierk, Nr. O-325/IXA, IXA — 1966/67.
9. A. Weinberg, E. Wigner. The Physical Theory of Neutron Chain Reactions. Chicago, The University of Chicago Press, 1958.

Критерий сравнения состояния твэлов активной зоны реактора

Н. Г. Баданина, Ю. П. Сайгов

УДК 621.039.548.535

В качестве критерия сравнения состояния твэлов активной зоны на малой мощности реактора, позволяющего оценивать удельную активность воды первого контура, обусловленную осколочными изотопами, в период работы реак-

тора на большой мощности, обычно используют удельную активность короткоживущего изотопа. Равновесная активность такого изотопа достигается очень быстро и не зависит от работы фильтра, если выполняется условие $Q\bar{E}/V \ll \lambda$,