

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ УСТОЙЧИВЫХ ЦЕПОЧЕК ДЕЛЕНИЯ В РЕАКТОРАХ СО СЛАБЫМ ИСТОЧНИКОМ НЕЙТРОНОВ

А. А. Кайгородов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Статья поступила в редакцию 29.07.2021, после доработки – 10.08.2021, принята к публикации – 18.11.2021

Проведен анализ опубликованных экспериментальных работ по исследованию развития устойчивых цепочек деления в реакторах со слабым источником нейтронов. Показано, что наблюдается отличие результатов, полученных на GODIVA-II, от остальных экспериментальных данных.

Ключевые слова: реактор, цепь делений, эффективный коэффициент размножения нейтронов, активная зона, нейтрон.

INVESTIGATION OF STABLE FISSION PRODUCT CHAINS IN REACTORS WITH A WEAK NEUTRON SOURCE / A. A. Kajgorodov // There is performed the analysis of the published experimental works in studying stable fission-product chains evolution in reactors with weak neutron source. It is demonstrated that the difference between the results obtained on GODIVA-II and other experimental data is observed.

Key words: reactor, fission-product chain, effective neutron multiplication factor, core, neutron.

Введение

В реакторе со слабым источником нейтронов при развитии цепной реакции деления существенна роль статистических флуктуаций плотности нейтронов [1]. Режимам генерирования импульса при низком уровне мощности свойственна значительная, в пределах секунды или даже более, неопределенность во времени развития импульса, связанная с флуктуационной природой возникновения цепей делений.

Источниками флуктуаций в интенсивности цепной реакции в реакторах нулевой мощности могут быть:

1) флуктуации в числе нейтронов на деление, то есть вероятность распределения излучения нейтронов деления. Локальное возмущение нейтронов деления может вести к ло-

кальному увеличению потока нейтронов и значения $K_{эф}$;

2) флуктуации во времени между ядерными событиями;

3) вероятность, что частное событие может быть делением, поглощением или рассеянием.

В применении к задаче описания флуктуаций плотности нейтронов в статье Хансена [2] введены в рассмотрение два альтернативных понятия: ограниченные и бесконечные (устойчивые) цепи делений. Любой нейтрон, появившийся в реакторе, независимо от состояния последнего, может вызвать цепочку делений. Ограниченная цепочка может быть короткой или разветвленной, содержащей большое число делений, но также обрывающейся. Если цепь делений не обрывается при неизменности со-

стояния реактора, то она является неограниченной (устойчивой). При постоянной реактивности в подкритическом реакторе все цепочки, порождаемые отдельными нейтронами, могут быть только ограниченными. А в надкритическом реакторе лишь редкие нейтроны порождают устойчивые цепи делений.

В реакторах на быстрых нейтронах флуктуационные задержки в росте мощности на начальном участке почти полностью обусловлены временем установления первой устойчивой цепи деления. Эта особенность позволила Хансену ограничиться при исследовании начальной фазы роста мощности лишь рассмотрением флуктуаций в установлении устойчивой цепи делений, то есть не учитывать флуктуации в росте самой устойчивой цепи делений. При этом подходе были получены очень компактные и удобные для оперативных применений аналитические формулы для вероятности возникновения первой устойчивой цепи делений, для флуктуационной задержки развития импульса и сформулированы критерии «слабого» и «сильного» источника нейтронов. В качестве критерия «слабого» источника нейтронов получено следующее неравенство:

$$2S\tau/(\bar{\nu}\Gamma_2) \ll 1, \quad (1)$$

где S – интенсивность источника нейтронов, с^{-1} ; τ – время жизни мгновенных нейтронов в реакторе, с ; $\bar{\nu}$ – среднее число мгновенных нейтронов, излучаемых в акте деления; Γ_2 – константа, для различных делящихся нуклидов близка к 0,8.

Поскольку для различных делящихся материалов $2/(\bar{\nu}\Gamma_2) \approx 1$, то неравенство (1) можно представить упрощенно,

$$S\tau \ll 1. \quad (2)$$

С особой четкостью влияние флуктуаций плотности нейтронов проявляется в быстрых аperiодических импульсных реакторах (АИР) с активной зоной (АЗ) из высокообогащенного изотопом ^{235}U (ВОУ) металлического урана. В этом случае порядок величины τ составляет $10^{-8} - 10^{-9}$ с. Тогда из неравенства (2) на интенсивность источника нейтронов накладыва-

ется ограничение: $S \ll 10^8 \text{ с}^{-1}$, что выполняется в урановой АЗ при отсутствии стороннего источника нейтронов. Импульс в этих реакторах при наличии требуемой для генерирования импульса реактивности развивается в среднем через секунды, а не через миллисекунды, как это следует из уравнений обычной кинетики.

Отмеченные особенности поведения мощности размножающей системы при слабом источнике нейтронов или на начальном участке разгона мощности влияют на расчетные оценки аварийного энерговыделения в реакторе, поскольку за время развития устойчивой цепочки делений возможен ввод дополнительной реактивности. Для проверки расчетов на реакторах с АЗ из ВОУ проводились эксперименты по исследованию времени задержки развития импульса на мгновенных нейтронах в отсутствие стороннего источника нейтронов.

1. Эксперименты по измерению задержки развития импульса в реакторе Godiva-II

На реакторе GODIVA-II (рис. 1) была выполнена серия из 94 измерений [3], в которых определяли время, прошедшее от ступенчатого ввода начальной избыточной реактивности до момента достижения высокой интенсивности делений в реакторе (то есть до момента фиксации импульса). Измерения проводили в условиях наличия лишь слабого источника нейтронов, связанного со спонтанными делениями ядер урана ($\sim 90 \text{ с}^{-1}$) и распадом предшественников запаздывающих нейтронов ($\sim 200 \text{ с}^{-1}$).

Вводимая избыточная реактивность составляла $0,05\beta_{\text{эф}}$ или примерно $3,5 \cdot 10^{-4}$ выше критичности по мгновенным нейтронам. Этапу ввода этой реактивности предшествовала операция нахождения критического состояния с учетом запаздывающих нейтронов, ее проводили на уровне мощности около 1 Вт. Продолжительность времени высвечивания предшественников составляла 20 минут. Импульсный стержень вводили в АЗ через 15 секунд после возвращения в критическое состояние с учетом запаздывающих нейтронов. За ука-

занные 15 секунд выдержки в критическом состоянии интенсивность источника нейтронов в АЗ возрастала примерно в 3 раза.

Результаты эксперимента представлены в табл. 1. При слабом источнике нейтронов импульс в Godiva-II развивается с запаздыванием от десятых долей секунды до 11 секунд. Это запаздывание очень значительно, если сопоставлять его с равным ~ 1 мс временем раз-

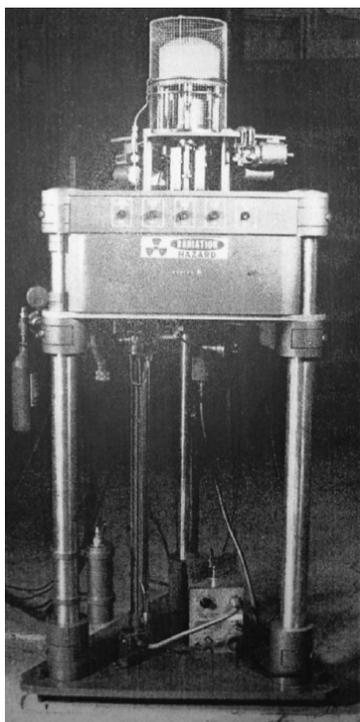


Рис. 1. Реактор Godiva-II

вития импульса в рамках детерминированной кинетики АИР.

2. Эксперименты по измерению задержки развития импульса в реакторе APRFR

Аналогичные эксперименты проведены на быстром АИР APRFR [4]. Избыточная реактивность по мгновенным нейтронам, соответствующая номинальному импульсу делений и равная $7,5 \cdot 10^{-4}$, вводилась не ступенчато (то есть мгновенно), а за некоторое время (полный ввод импульсного стержня осуществлялся за 0,325 с). Инициированию импульса предшествовал 20-минутный интервал выдерживания реактора в подкритическом состоянии.

Результаты измерений приведены в табл. 2. В данном случае также имеет место значительная, хоть и не столь большая, как в Godiva-II, флуктуационная задержка в развитии импульса. Уменьшение в сравнении с Godiva-II задержки связано, во-первых, с большей в APRFR начальной реактивностью и, во-вторых, по-видимому, с большей интенсивностью источника нейтронов. В этом эксперименте два импульса из общего числа (65) были инициированы преждевременно, то есть до окончания ввода избыточной реактивности.

Таблица 1

Экспериментальное распределение количества импульсов реактора Godiva-II для времени ожидания развития импульса делений после перевода реактора в надкритическое состояние по мгновенным нейтронам (избыточная реактивность выше мгновенной критичности составляла $0,05 \beta_{эф}$)

Время ожидания импульса, с	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Количество импульсов	11	21	22	12	9	6	3	4	3	2	1

Таблица 2

Экспериментальное распределение количества импульсов реактора APRFR для времени ожидания развития импульса делений после перевода реактора в надкритическое состояние по мгновенным нейтронам (избыточная реактивность выше мгновенной критичности составляла $0,11 \beta_{эф}$)

Время ожидания импульса, с	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5
Количество импульсов	2	23	17	13	5	1	2	2

3. Эксперименты по измерению задержки развития импульса в реакторе SPR-II

Экспериментальное наблюдение следствий флуктуации нейтронной плотности проводили также на ранней стадии эксплуатации АИР SPR-II [5]. Вероятность преждевременного инициирования импульса делений в реакторе SPR-II при слабом источнике оказалась больше, чем ожидалось на основе теоретических представлений и экспериментов на Godiva-II. Причиной расхождения называется более высокая в SPR-II, в сравнении с реактором Godiva-II, остаточная γ -активность АЗ, увеличивающаяся в результате фотоядерных реакций действующий в реакторе «внутренний» источник нейтронов.

4. Эксперименты по измерению задержки развития импульса в реакторе БИР

Эксперименты по изучению развития импульса делений в надкритическом по мгновенным нейтронам состоянии реактора при слабом источнике нейтронов в АЗ проводились в 1990-х гг. на реакторе БИР-2М (рис. 2) [6] при отработке макета быстродействующей аварийной защиты (БАЗ) [7]. Макет БАЗ предназначен для изучения возможности быстрого заглушения импульсного реактора БИР-2М при скорости нарастания мощности делений в АЗ выше установленного предела или по достижении заданного уровня мощности. Принцип действия БАЗ заключается в быстром (~ 200 мкс) удалении из центрального канала АЗ полиэтиленовой пули, что уменьшает реактивность реактора и переводит его в подкритическое состояние по мгновенным нейтронам. Наличие БАЗ позволило многократно и сравнительно часто производить пуск реактора без разогрева АЗ (и, следовательно, без нагружения ее деталей). Отсутствие разогрева АЗ объясняется тем, что мощность за «оборванный» импульс делений (~ 400 Вт) на ~ 7 порядков меньше, чем в полномасштабном импульсе (3,8 ГВт).

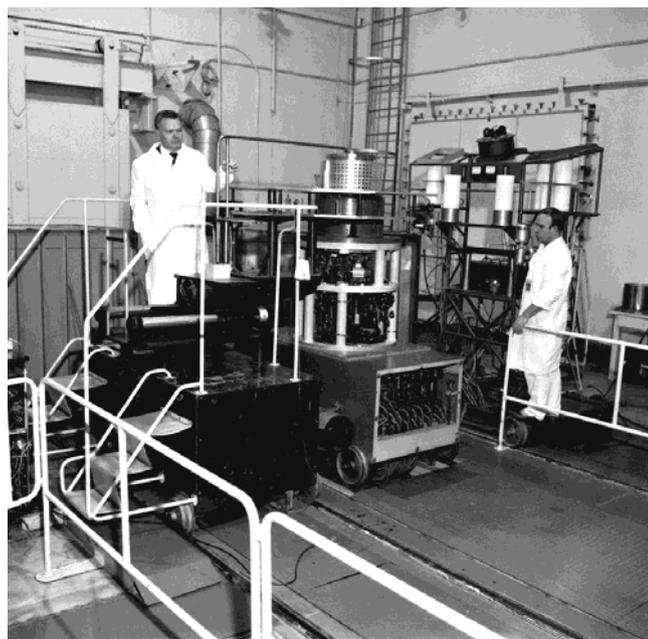


Рис. 2. Реактор БИР-2М

Измерения возмущения реактивности реактора элементами БАЗ проводились в специальных опытах. Установлено, что опускание устройства отстрела с полиэтиленовой пулей в АЗ реактора увеличивает реактивность на $(0,959 \pm 0,006) \beta_{эф}$, а удаление пули из устройства отстрела уменьшает реактивность на $(0,315 \pm 0,002) \beta_{эф}$.

Алгоритм работы макета БАЗ и реактора БИР-2М заключался в следующем. В исходном состоянии кассета заряжена пятью устройствами отстрела (одно из которых опущено в центральный канал реактора). Реактор выводится в стартовое состояние в калибровочном режиме, источник нейтронов удаляется из реактора, стержни БС (быстрый стержень) и ИС (импульсный стержень) опущены в нижнее положение. После 30 минут высвечивания источников запаздывающих нейтронов поднимается стержень БС и вводится пневматический стержень ИС в центр АЗ. Этим достигается надкритическое по мгновенным нейтронам состояние реактора. При инициировании от фоновых нейтронов (нейтронов «внутреннего» источника) импульса делений (по достижении заданного уровня мощности или порогового периода разгона) из блока измерения нейтронного потока (МИТ) поступает сигнал на срабатывание устройства отстрела.

Полиэтиленовая пуля вылетает из ствола и тем самым переводит реактор в подкритическое состояние по мгновенным нейтронам. Одновременно сигнал подается на сброс стержня БС, что переводит реактор в подкритическое состояние по запаздывающим нейтронам. Также подается сигнал на пневматический спуск стержня ИО, что также увеличивает подкритичность реактора. После заглушения реактора подготавливается следующий пуск. При этом дистанционно производится:

- замена сработавшего устройства отстрела на новое;
- перемещение источника нейтронов к АЗ;
- поднятие стержня БС в верхнее положение;
- подбор и измерение стартовой реактивности;
- опускание стержня БС, удаление источника нейтронов, высвечивание источников запаздывающих нейтронов.

После выполнения указанных процедур реактор и макет БАЗ готовы к новому пуску.

Фон нейтронов от заглушенного реактора (все стержни и блок безопасности находятся в нижнем положении) составляет $1,4 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$. При поднятом блоке безопасности в конце 30-минутного высвечивания фон составляет

$1,8 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, а после подъема стержня БС в верхнее положение нейтронный фон равен $6 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, что на порядок превышает значение фона заглушенного реактора.

Опыты проводились при трех значениях избыточной реактивности реактора по мгновенным нейтронам: $\rho_p = 0,03\beta_{эф}$; $0,05\beta_{эф}$; $0,07\beta_{эф}$. Результаты экспериментов представлены в табл. 3 и на рис. 3. Всего проведено около 200 пусков реактора.

При $\rho_p = 0,03\beta_{эф}$ проведено 60 пусков реактора с включенным макетом БАЗ и 9 пусков без макета БАЗ. В последнем случае генерировались полномасштабные импульсы делений. Времена ожидания в рассматриваемых опытах имели значения от 0,023 с до 5,71 с. Среднее время ожидания составляет 0,843 с.

При $\rho_p = 0,05\beta_{эф}$ проведено 115 опытов. Времена ожидания имели значения от 0 с до 4,87 с. Среднее время ожидания составляет 0,976 с.

При $\rho_p = 0,07\beta_{эф}$ проведено 12 опытов. Времена ожидания находились в диапазоне от 0,004 с до 2,475 с. Среднее время ожидания составляет 0,942 с.

Таблица 3

Экспериментальное распределение количества импульсов реактора БИР-2М для времени ожидания развития импульса делений после перевода реактора в надкритическое состояние по мгновенным нейтронам

Временной интервал ожидания импульса, с	ρ_p		
	$0,03\beta_{эф}$	$0,05\beta_{эф}$	$0,07\beta_{эф}$
От 0 до 0,5 включ.	29	33	5
св. 0,5 до 1 включ.	18	34	2
св. 1 до 1,5 включ.	11	22	1
св. 1,5 до 2 включ.	5	6	0
св. 2 до 2,5 включ.	1	7	2
св. 2,5 до 3 включ.	0	3	1
св. 3 до 3,5 включ.	1	1	–
св. 3,5 до 4 включ.	0	1	–
св. 4 до 5 включ.	0	1	–
св. 5 до 6 включ.	1	–	–

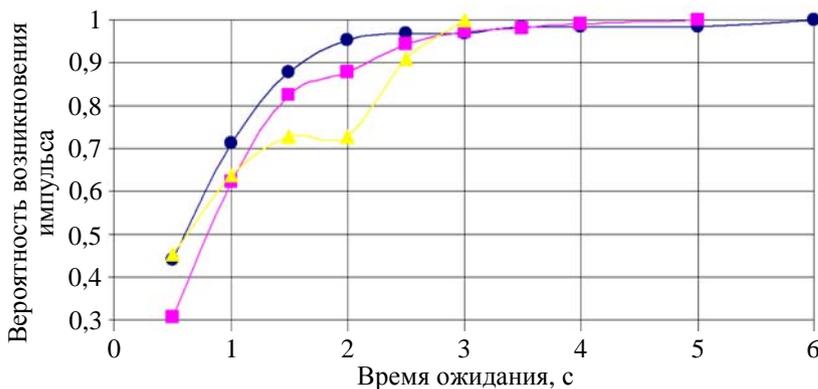


Рис. 3. Вероятность времени ожидания для возникновения устойчивой цепочки деления на реакторе БИР-2М с реактивностью $0,03\beta_{эф}$ (●); $0,05\beta_{эф}$ (■); $0,07\beta_{эф}$ (▲)

5. Эксперименты по измерению задержки развития импульса в реакторе CALIBAN

На быстром АИР Caliban (рис. 4) проводились эксперименты по измерению времени задержки между достижением надкритического состояния по мгновенным нейтронам ($\rho_p = 0,083\beta_{эф}$; $K_{эф} = 1,0072$) и нейтронным импульсом без внешнего источника нейтронов [8]. Уровень нейтронного фона (200 с^{-1}) измерялся в подкритическом состоянии реак-

тора при $K_{эф} = 0,9$. Проведено 114 импульсных экспериментов, результаты представлены в табл. 4. Среднее время задержки импульса составило $0,742 \text{ с}$. На основании проведенных расчетов методом дискретных ординат по программе PANDA получено среднее время задержки импульса $0,769 \text{ с}$, что находится в удовлетворительном согласии с экспериментом. При этом не рассматривались импульсы, которые произошли раньше, чем импульсный стержень был полностью введен в АЗ.



Рис. 4. Реактор Caliban

Таблица 4

Экспериментальное распределение количества импульсов реактора CALIBAN для времени ожидания развития импульса делений после перевода реактора в надкритическое состояние по мгновенным нейтронам (избыточная реактивность выше мгновенной критичности составляла $0,083 \beta_{эф}$)

Временной интервал ожидания импульса, с	От 0 до 0,5 включ.	св. 0,5 до 1 включ.	св. 1 до 1,5 включ.	св. 1,5 до 2 включ.	св. 2 до 2,5 включ.	св. 2,5 до 3 включ.	св. 3 до 3,5 включ.
Количество импульсов	57	23	18	9	4	2	1

6. Анализ опубликованных экспериментальных данных по исследованию развития устойчивых цепочек деления в РС со слабым источником нейтронов

Имеющиеся экспериментальные данные по времени ожидания возникновения устойчивой цепочки деления в реакторах GODIVA-II, APRFR, CALIBAN, БИР-2М представлены на рис. 5. Характеристики реакторов такого типа в подобных экспериментах (надкритичность по мгновенным нейтронам, интенсивность «внутреннего» источника нейтронов в АЗ, масса АЗ) приведены в табл. 5.

Из совокупности экспериментальной информации можно сделать следующие выводы.

1. Распределения вероятности возникновения импульса в реакторах APRFR, CALIBAN и БИР-2М практически совпадают и слабо зависят от характеристики реактора (масса АЗ, переход через мгновенную критичность, ин-

тенсивность «внутреннего» источника нейтронов).

2. Экспериментальные данные, полученные на реакторе GODIVA-II и часто используемые для верификации методов расчета устойчивых цепочек деления, отличаются от полученных на других исследовательских ядерных установках.

Расхождение экспериментальных данных отмечали неоднократно и ранее [1, 5]. Это объяснялось низкой интенсивностью «внутреннего» источника нейтронов в АЗ GODIVA-II. Приведенные в табл. 5 характеристики различных реакторов показывают, что в реакторе CALIBAN наблюдается такой же уровень фона в режиме высвечивания, что и в GODIVA-II, но распределение вероятностей отличается значительно. Разрешением указанных противоречий видится постановка новых расчетно-экспериментальных исследований с тщательной регистрацией уровня потока нейтронов при различных значениях реактивности реактора.

Таблица 5

Характеристики реакторов в экспериментах по исследованию вероятности возникновения устойчивой цепочки деления

Характеристика	Реактор				
	GODIVA-II	CALIBAN	APRFR	БИР-2М	SPR-II
Материал АЗ	²³⁵ U (93,5 %)	²³⁵ U(93 %) + Mo(10 %)	²³⁵ U(93,2 %) + Mo(10 %)	²³⁵ U(85 %) + Mo(6 %)	²³⁵ U(93,2 %) + Mo(10 %)
Масса АЗ, кг	57,7	110	106	121	105
Максимальное число делений в импульсе	$3 \cdot 10^{16}$	$5,8 \cdot 10^{16}$	$1,5 \cdot 10^{17}$	$1 \cdot 10^{17}$	$1,2 \cdot 10^{17}$
Интенсивность нейтронного фона, с ⁻¹	300 (~10 ^{3*})	200	–	1400 (60000*)	–
Реактивность по мгновенным нейтронам в эксперименте, β _{эф}	0,05	0,083	0,11	0,03; 0,05; 0,07	–
Среднее время ожидания импульса, с	3,6	0,8	1,1	0,9; 1,0; 1,0	–

* Для реактора в стартовой позиции.

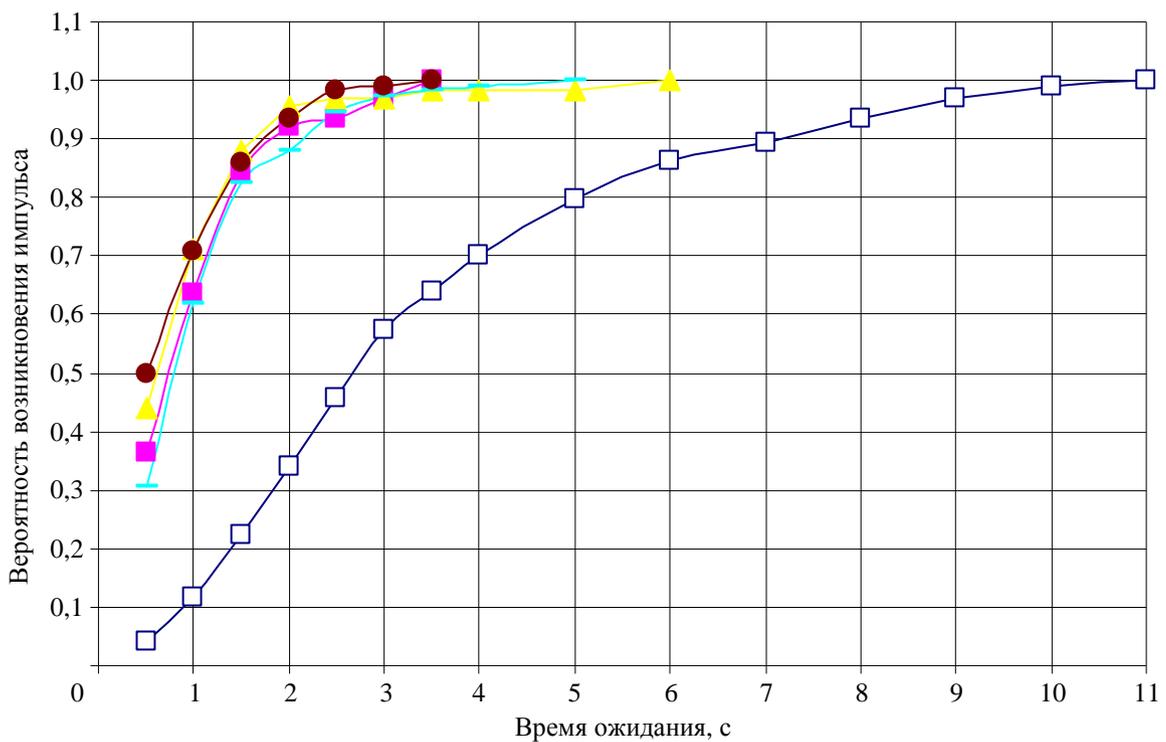


Рис. 5. Вероятность времени ожидания для возникновения устойчивой цепочки деления на реакторах GODIVA-II (□); CALIBAN (●); APRFR (■); БИР-2М (▲ – при $\rho_p = 0,03\beta_{эф}$, — $\rho_p = 0,05\beta_{эф}$)

Заключение

В работе рассмотрен процесс развития устойчивых цепочек деления в РС, обусловленных статистическими флуктуациями плотности нейтронов, возникающих в ядерных реакциях внутри АЗ. Импульс в реакторах с АЗ из ВОУ при отсутствии стороннего источника нейтронов развивается в среднем через секунды.

Обзор опубликованных работ по измерению времени задержки импульса показал, что экспериментальные данные, полученные на реакторе GODIVA-II, отличаются от полученных на других исследовательских ядерных установках (APRFR, CALIBAN, БИР-2М). Разрешением противоречий в экспериментальных данных видится постановка новых уточняющих экспериментов с определением зависимости времени задержки генерации импульса реактора от количества фоновых нейтронов, а также от мгновенной реактивности реактора.

Список литературы

1. Колесов В. Ф. Аперiodические импульсные реакторы. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2007. Т. 1. 553 с.
2. Hansen G.E. Assembly of fissionable material in the presence of a weak neutron source // Nucl. Sci. Eng. 1960. Vol. 8, N 6. P. 709–719.
3. Wimett T.F., White R.H., Stratton W.R., Wood D.P. Godiva-II – an unmoderated pulse-irradiation reactor // Nucl. Sci. Eng. 1960. Vol. 8, N 6. P. 691–708.
4. Kazi H. Preinitiation measurements with a fast pulse reactor // Trans. Amer. Nucl. Soc. 1971. Vol. 14, N 2. P. 763–764.
5. O'Brien P. D. Design problems // Proc. of the National Topical Meeting on fast burst reactors held at the University of New Mexiko, Albuquerque, 1969. P. 625–628.
6. Сибгатуллин И. З., Кувшинов М. И. Импульсный реактор БИР-2М. История, развитие, применения, исследования // Импульсные реакторы: история создания и перспективы ис-

пользования. Труды межотраслевой научной конференции. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2016. Т. 1. С. 113–122.

7. Воронцов С. В., Кувшинов М. И., Сибгатуллин И. З. Нейтронно-физические эксперименты на импульсных реакторах БИР-2М и БИГР // Импульсные реакторы: история создания и перспективы использования. Труды межотраслевой научной конференции. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2016. Т. 1. С. 353–363.

8. Humbert P., Mechtoua B. Simulation of Caliban reactor burst wait time and initiation probability using a point reactor model and PANDA code. PHYSOR 2004. – Chicago, Illinois, 2004.

Контактная информация –

Кайгородов Алексей Анатольевич,
старший научный сотрудник ИЯРФ,
РФЯЦ-ВНИИЭФ,
e-mail: otd4@exped.vniief.ru

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2021, вып. 4, с. 85–93.