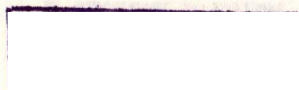


ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ
АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ИНФОРМАЦИИ
И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО АТОМНОЙ НАУКЕ И ТЕХНИКЕ

ВОПРОСЫ
АТОМНОЙ НАУКИ
И ТЕХНИКИ



2 Н
14333
22

СЕРИЯ:

ИМПУЛЬСНЫЕ РЕАКТОРЫ
И
ПРОСТЫЕ КРИТИЧЕСКИЕ СБОРКИ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Издается с 1978 г.

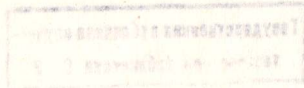
Выпуск 2

МОСКВА—1988

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ИСПОЛЗОВАНИЮ
АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ИНФОРМАЦИИ
И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО АТОМНОЙ НАУКЕ И ТЕХНИКЕ

ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ



Главный редактор В.Ф. Колесов

Редакционная коллегия:

З.И. Абрамова - ответственный секретарь, А.М. Воинов - зам. главного редактора, В.Г. Заграфов,
М.И. Кувшинов, С.А. Новиков, И.С. Погребов, В.М. Талызин, В.А. Терехин, С.К. Штарев, В.И. Шферев

Издаётся с 1973 г.

Выпуск

МОСКВА-1988

© Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по атомной науке и технике (ЦНИИатоминформ), 1988

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЯЗАННЫХ СИСТЕМ, СОДЕРЖАЩИХ ИМПУЛЬСНЫЙ РЕАКТОР БИР И ПОДКРИТИЧЕСКУЮ СБОРКУ

М.И.Кувшинов, П.Ф.Чередник, И.И.Игнатов, Ю.М.Недойкаш, Г.П.Рудаков, Е.С.Соболев

Экспериментально изучались системы связанных импульсных реакторов, включавших реактор БИР и ПС сферической формы. Были выбраны четыре ПС, различающиеся реактивностью, составом и временем жизни нейтронов. Измерены реактивности, распределения флюенса нейтронов, постоянные спада мгновенных нейтронов, а также характеристики импульсов в обоих компонентах связанной системы.

В в е д е н и е

Связанная система — импульсный реактор + подкритическая сборка (ПС) — является разновидностью связанных импульсных реакторов [1]. Целесообразность использования таких систем, в частности, основана на возможности получать интенсивные потоки нейтронов в больших объемах для облучений и изменять в широких пределах длительность импульса делений при максимальном энерговыделении в активной зоне (АЗ). Кроме того, связанной системой можно управлять, имея органы регулирования реактивности лишь в одном компоненте, что иногда представляется желательным.

Характерной чертой связанной системы является наличие делений в каждом из компонентов, производимых нейтронами, прилетевшими из противоположного компонента. Особенностью импульсной связанной системы является то, что реактивность, доля нейтронов, попадающих из одного компонента в другой, и мощность в каждом из компонентов изменяются в течение развития импульса делений.

Свойства связанной системы зависят от целого ряда параметров каждого из компонентов

и системы в целом. К таким параметрам относятся: реактивность, геометрия и состав каждого компонента, время жизни и спектр нейтронов в них, а также расстояние между АЗ.

Теоретические исследования связанных систем, содержащих импульсный реактор и ПС, выполнены в работе [2]. Экспериментальные работы на связанных системах, содержащих импульсный реактор БИР [3] и ряд ПС, различающихся параметрами, были выполнены в 1974 г. Основные результаты этих работ составляют содержание данной статьи.

Комплекс исследований в каждом варианте включал измерения:

- реактивности и временных характеристик размножения изолированных ПС и АЗ БИР;
- стартовой (перед вводом импульсного стержня (ИС) в АЗ) и избыточной (после введения ИС в АЗ) реактивности связанной системы;
- распределений чисел делений и флюенса нейтронов в АЗ, ПС и в пространстве между ними (при стационарном и импульсном режимах работы);
- временных характеристик размножения на мгновенных нейтронах для связанной системы;
- параметров импульсов делений в каждом

компоненте: энергосвечения, амплитуды мощности, периода разгона, полуширины пика делений, формы импульса.

Экспериментальное оборудование

Для проведения рассматриваемых экспериментов в дополнение к штатному оборудованию реактора БИР было создано устройство дистанционного сближения (УДС) ПС и АЗ реактора. Общий вид связанной системы схематически изображен на рис. I. УДС помимо перемещения ПС по горизонтали позволяет также дистанционно производить сближение и разведение составных частей ПС в вертикальном направлении. Ход подвижной части ПС по вертикали составляет 90 мм, перемещение ПС по горизонтали - 500 мм.

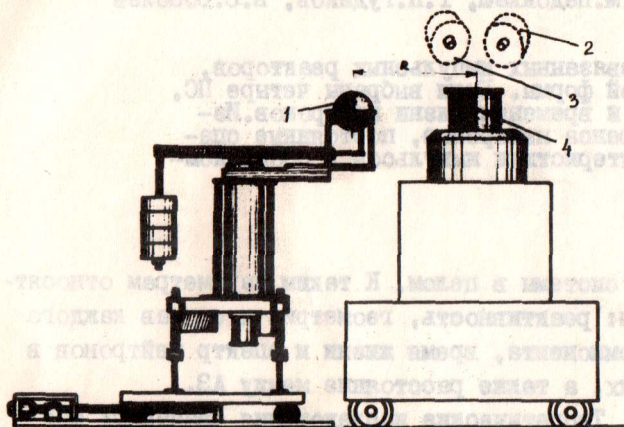


Рис. I. Схема эксперимента: I - ПС; 2 и 3 - счетчики нейтронов; 4 - АЗ БИР

Для изучения были выбраны четыре ПС с резко различающимися физическими характеристиками (табл. I).

В первую группу (ПС-I и ПС-4) входили две металлические сборки из высокообогащенного урана сферической формы с большой центральной полостью (без отражателя), различающиеся значением их реактивности $-12,3\beta_{эф}$ и $-1,1\beta_{эф}$.

Во вторую группу (ПС-2 и ПС-3) входили две сферические металлические сборки из высокообогащенного урана с водородосодержащим отражателем, сильно увеличивающим среднее время жизни мгновенных нейтронов. Значения реактивности этихборок также значительно различались между собой: $-12,6\beta_{эф}$ и $-0,83\beta_{эф}$.

Для обеспечения требований ядерной безопасности каждая ПС была разделена на две (неравные) части: неподвижную (верхнюю), установленную на стальной диафрагме, и подвижную

Состав и геометрия ПС

ПС	Внутренний и внешний диаметры, мм, масса, кг			
	АЗ (сфера)		Отражатель (сфера)	Неподвижная часть ПС (полусфера)
	$^{235}\text{U}(90\%)$	$^{235}\text{U}(15\%)$	$ZrH_{1,6}$	$^{235}\text{U}(90\%)$ или $ZrH_{1,6}$
ПС-I	135-230 $m=91,2$	-	-	210-230
ПС-2	151-210 $m=52,24$	210-217 $m=9,38$	217-275 $m=29,71$	217-275
ПС-3	135-210 $m=61,41$	210-217 $m=9,38$	217-275 $m=29,71$	135-275
ПС-4	120-230 $m=97,6$	-	-	183-230

(нижнюю), смонтированную на конфорке. Толщина стальной диафрагмы для ПС-I и ПС-2 составляла 1 мм, для ПС-3 и ПС-4 - 4 мм. Набор сменных конфорок позволял монтировать на стенде УДС сферические сборки различного диаметра с сохранением высоты центра ПС относительно пола помещения (2 м). Центры ПС и АЗ БИР находились на одном горизонтальном уровне.

ПС-I и ПС-4 имели оболочку из кадмия толщиной 1 мм, вплотную прилегающую к наружной поверхности сборки. Система управления и защиты УДС удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к устройствам для сборки критических систем.

При работе в стационарном режиме регистрация потока нейтронов производилась активационными детекторами (медь, никель) и стандартными детекторами БИР: "всеволновым" счетчиком и импульсными камерами деления со слоями из обогащенного и природного урана. Характеристики импульса делений регистрировались с помощью токовых вакуумных камер деления, терморпар и активационных детекторов. При проведении опытов реактор БИР и УДС размещались примерно в центре зала размером 10x10x10 м, имеющего толстые бетонные стены и потолочное перекрытие.

Измерение и калибровка реактивности

Для каждой изолированной ПС реактивность измерялась в единицах $\beta_{эф}$ методом Шестранда [4].

Реактивность изолированной АЗ реактора БИР и реактивность связанных систем измерялась также в единицах $\beta_{эф}$. В этих случаях процесс измерений состоял из двух этапов. Первоначально реактивность измерялась в единицах обратного коэффициента умножения, точнее в единицах $\Delta = 10^3 N_0 / N$. Здесь N — скорость счета детектора нейтронов, обусловленная нейтронами утечки из АЗ БИР или из связанной системы при размещении ^{252}Cf нейтронного источника в центре АЗ БИР; N_0 — скорость счета от того же ^{252}Cf источника нейтронов, размещенного в центре стальной модели АЗ БИР. Далее для изолированной АЗ БИР и для каждой связанной системы при заданном расстоянии между ее компонентами снималась "кривая обратных часов". При этом реактивность представлялась в шкале Δ .

Критическое состояние по мгновенным нейтронам определялось по точке перегиба кривой обратных часов, а соответствующая этой точке реактивность в единицах Δ приравнивалась к $1/\beta_{эф}$ для данной системы.

Таким образом определялась связь единиц реактивности Δ с $\beta_{эф}$.

Для изолированного реактора БИР и для каждой связанной системы измерялась полная реактивность, вносимая ИС и регулирующим стержнем (РС). Кроме того, производилось измерение зависимости вклада РС в реактивность системы от его положения в АЗ, определяемого по указателю, расположенному на пульте управления. Эти данные использовались, в частности, при определении реактивности системы в момент генерирования импульса делений.

Основные результаты измерений реактивности для связанных систем и изолированных компонентов представлены в табл. 2 и 3. В табл. 3 приведены также параметры импульсоделений.

Таблица 2

"Вес" органов регулирования БИР в составе связанной системы

Система	R^* , мм	Полный "вес" стержня, $\beta_{эф}$		Отношение "веса" стержня в связанной системе к "весу" для изолированного БИР	
		ИС	РС	ИС	РС
Изолированный БИР	-	1,140±0,002	1,128±0,002	1,00	1,00
АЗ-ПС-1	380	1,052±0,002	1,096±0,003	0,923±0,003	0,972±0,004
	550	1,126±0,002	1,125±0,002	0,960±0,003	0,997±0,004
АЗ-ПС-2	388	1,082±0,004	1,140±0,007	0,949±0,004	0,987±0,007
	550	1,128±0,005	1,124±0,004	0,990±0,005	0,996±0,005
АЗ-ПС-3	550	0,512±0,004	0,530±0,005	0,448±0,020	0,469±0,020
	865	0,994±0,003	0,996±0,003	0,872±0,004	0,883±0,004
АЗ-ПС-4	550	0,569±0,005	0,590±0,005	0,50 ±0,02	0,524±0,020
	865	1,036±0,005	1,030±0,005	0,909±0,005	0,913±0,005

* R — расстояние между центрами АЗ и ПС.

Реактивность связанных систем и изолированных компонентов. Основные параметры импульсов делений в связанных системах

Связанная система	Растояние между центрами масс компонентов, мм		Реактивность, $\beta_{эф}$				Параметры импульсов					
	связанной системы		изолированного компонента		Период разгона на мощность, мкс	Полуширина, мкс		Энерговыделение, мДж		Пиковая мощность делений/с. 10 ¹⁹		
	в момент генерирования импульса	"Вес" ИС	ПС	АЗ БРП		АЗ БРП	ПС	АЗ БРП	ПС	АЗ БРП	ПС	
		АЗ БРП			ПС							АЗ БРП
АЗ БРП И ПС-1	380	1,026			0,176	340	310	0,90	0,15	3,35	0,62	
		1,045	1,052±0,002		0,194	150	150	1,33	0,29	13,2	2,7	
		1,056		-12,3±0,8	0,205	105	110	1,60	0,35	26,9	5,4	
ПС-1	550	1,071			0,221	85	86	1,95	0,42	46,8	9,8	
		1,062	1,126±0,002		0,911	82	81	2,00	0,17	33,3	-	
		1,063			0,912	80	80	2,00	0,20	43,8	4,4	
	865	1,069	1,140±0,002		1,069	80	78	2,07	0,08	56,5	2,2	
		1,027			0,391	1240	1200	0,87	0,14	1,12	0,15	
		1,052			0,416	550	580	1,73	0,30	5,13	0,80	
	380	1,070	1,082±0,004		0,434	410	410	2,13	0,36	8,93	1,35	
		1,085			0,449	350	350	2,40	0,41	12,3	1,90	
АЗ БРП И ПС-2		1,096		-12,6±0,6	0,460	310	305	2,67	0,46	16,5	2,3	
	550	1,052	1,128±0,005		0,925	180	190	1,57	0,13	13,6	1,2	
		1,075			0,948	100	110	2,22	0,18	37,0	2,3	
	865	1,067	1,140±0,002		1,067	80	92	2,09	0,06	49,3	1,4	
		1,050			0,968	545	615	1,66	0,30	4,8	0,79	
АЗ БРП И ПС-3	865	1,070	0,994±0,003	-0,83±0,03	0,988	240	410	2,09	0,40	1,68	1,7	
		1,092			1,010	105	270	2,68	0,50	4,48	3,7	
	865	1,030	1,036±0,005	-1,10±0,03	0,923	200	200	1,15	0,26	8,03	1,9	
		1,045			0,938	114	118	1,54	0,37	19,3	4,2	
ПС-4		1,062			0,955	74	84	2,22	0,47	64,5	12,4	

Пространственное распределение флюенса нейтронов

Для измерения пространственного распределения флюенса нейтронов применялся метод активационных детекторов (^{64}Cu и ^{58}Ni). Наведенная γ -активность измерялась с помощью оптимизированного спектрометра с кристаллом $\text{NaJ}(\text{Te})$ размером 80×80 мм. Для определения коэффициента связи между активностью детектора A (γ -квант/(с·г)) и флюенсом нейтронов Φ (нейтр/см²) было проведено калибровочное облучение детекторов из меди и никеля в центральном канале АЗ БИР.

Так как спектры нейтронов в АЗ реактора БИР и в центральной полости использованных ПС различаются незначительно, то полученные при указанной калибровке значения коэффициентов для каждого из детекторов можно использовать (помимо АЗ БИР) и для определения флюенса нейтронов в полости ПС.

В пространстве между АЗ и ПС данные по активности никелевых детекторов допустимо использовать для приближенных измерений флюенса нейтронов, тогда как значения γ -активности медных детекторов позволяют лишь оценить от-

носительные распределения флюенса в этой области пространства. Поэтому в дальнейшем используются термины: "флюенс нейтронов по никелю" и "активация меди".

В АЗ реактора БИР активационные детекторы (диаметром 10 мм и толщиной 1 мм) размещались в щелях между чехлами топливных дисков по трем радиусам: 1 - в направлении на ПС; 2 - в противоположном направлении; 3 - под углом 90° к оси ПС-АЗ. В ПС активационные детекторы (диаметром 10 и 20 мм, толщиной 1 и 0,1 мм) размещались на ее внешней поверхности, в щелях между полушарами и в центральной полости.

В пространстве между ПС и АЗ БИР детекторы (диаметром 10 и 20 мм, толщиной 1 мм) размещались по оси, соединяющей АЗ и ПС, а также в вертикальном и горизонтальном направлениях на середине расстояния R между компонентами связанной системы. Облучение детекторов производилось статическим и импульсным потоком нейтронов.

На рис. 2-4 изображены распределения флюенса нейтронов (по никелю) и γ -активность меди вдоль оси, соединяющей АЗ и ПС в связанных системах.

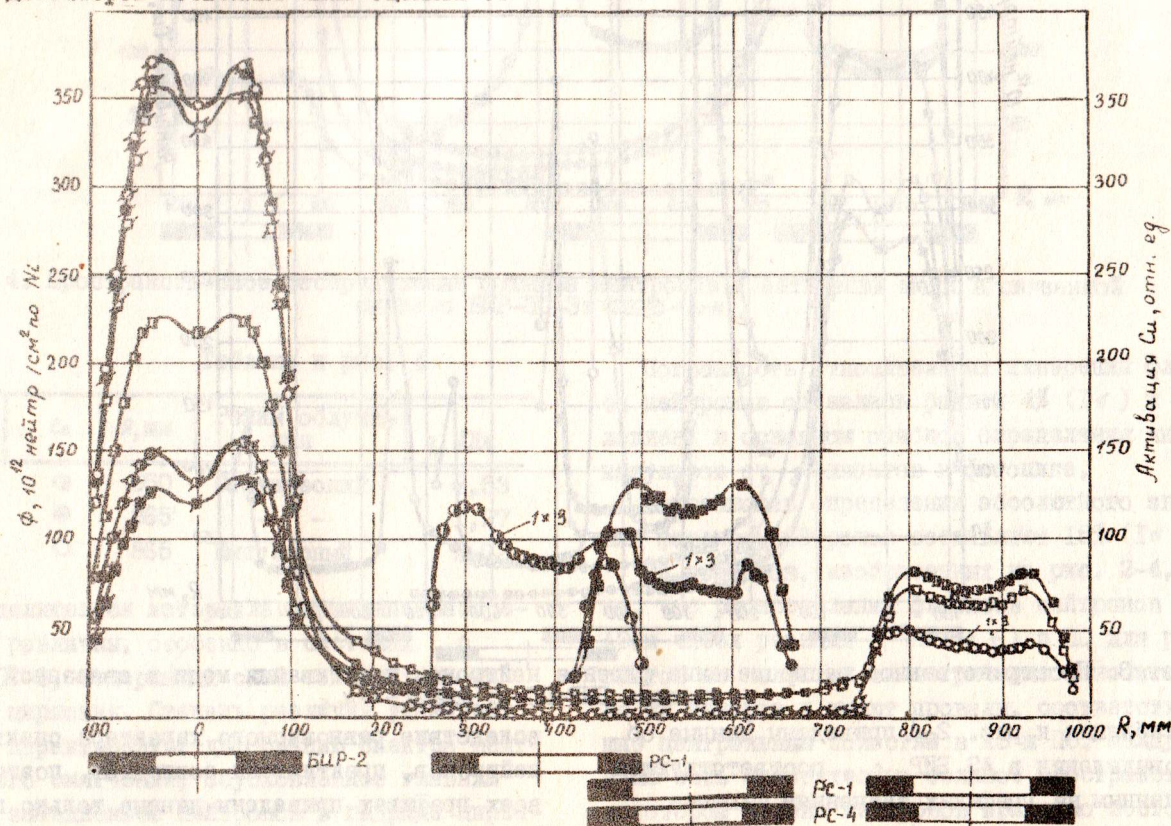


Рис. 2. Пространственное распределение флюенса нейтронов и активации меди в связанных системах БИР-ПС-I и БИР-ПС-4

Таблица к рис. 2

Система	R, мм	Ni	Cu	Режим облучения	φ_1 , МДж
БИР-ПС-I	380	○	●	Статический	0,89
- " -	865	○	○	Импульсный	2,11
- " -	550	●	●	- " -	2,03
БИР-ПС-4	550	■	■	Статический	0,86
- " -	865	■	■	- " -	1,45
- " -	865	□	□	Импульсный	2,22

Таблица к рис. 3

Ni	Cu	R, мм	Режим облучения	φ_1 , МДж
■	●	388	Статический	1,67
■	○	388	Импульсный	2,61
□	○	550	Статический	2,17
■	●	865	- " -	4,54

Под графиками на рисунках силуэтно показано расположение (по радиусу) делящегося материала и гидроциркония в АЗ и ПС. Распределение флюенса нейтронов и активации меди в АЗ

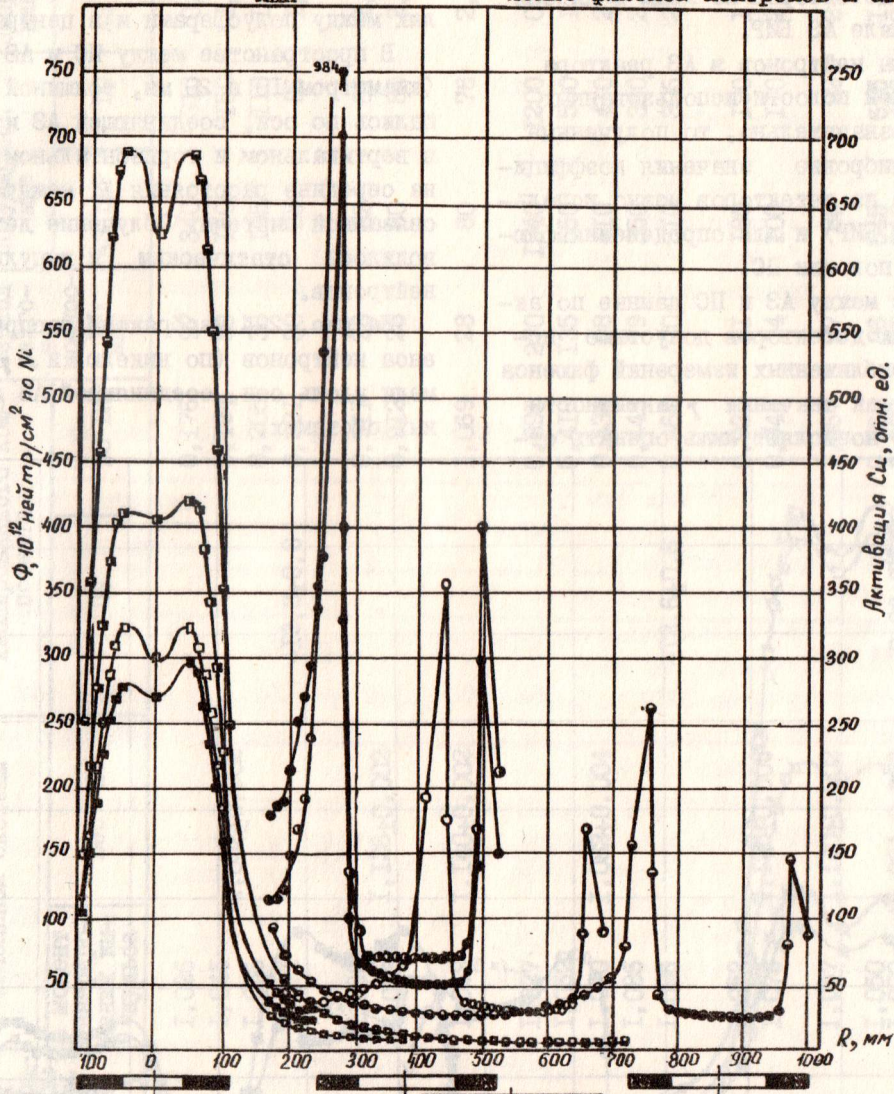


Рис. 3. Пространственное распределение флюенса нейтронов и активации меди в связанной системе БИР-ПС-2: $\text{ZrH}_{1,6}$ — заштрихованный участок

В таблицах к рис. 2-4 приведены данные об энерговыделении в АЗ БИР φ_1 , соответствующем приведенным на графиках значениям флюенса нейтронов, и о режиме облучения датчиков (импульсный или статический).

вследствие равновесного характера спектра нейтронов, практически совпадает, поэтому на всех графиках приведены данные только по нейтрону.

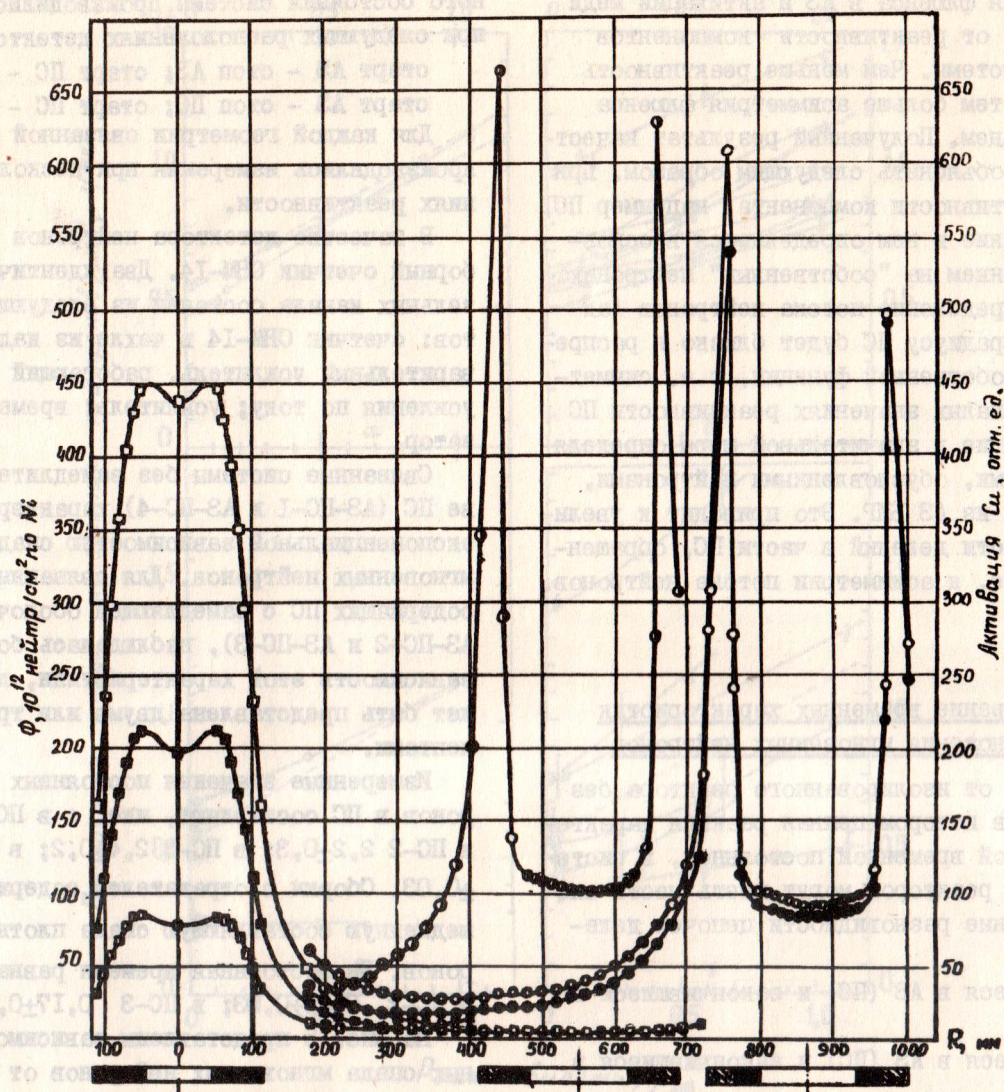


Рис. 4. Пространственное распределение флюенса нейтронов и активации меди в связанной системе БИР-ПС-3: \square - Статический режим, \bullet - Статический режим, \circ - Импульсный режим.

Таблица к рис. 4

Ni	Cu	$R, \text{мм}$	Режим облучения	$q, \text{МДж}$
\square	\circ	550	Статический	0,53
\blacksquare	\bullet	865	- " -	1,27
\square	\circ	865	Импульсный	2,72

Вне делящегося материала указанные распределения различны, особенно в системах с ПС-2 и ПС-3, содержащих слой замедлителя из гидрида циркония. Степень различия указанных величин характеризует деформацию спектра нейтронов, его смягчение, обусловленное главным образом замедлением нейтронов в гидриде циркония, а также в бетонных стенах помещения.

Погрешность относительных измерений флюенса нейтронов оказалась равной 4% (1σ) и обусловлена в основном ошибкой определения числа импульсов от γ -квантов в фотопике.

Погрешность определения абсолютного значения флюенса нейтронов составляет 15% (1σ).

Из графиков, изображенных на рис. 2-4, видно, что распределения флюенсов нейтронов в АЗ и чисел реакций $^{63}\text{Cu}(n, \gamma)$ в ПС для ряда опытов не являются симметричными относительно их центров и имеют провалы, соответствующие центральным полостям в АЗ и ПС. Между АЗ и ПС есть относительно большое пространство, в котором флюенс нейтронов примерно постоянен.

Асимметрия флюенса в АЗ и активации меди в ПС зависят от реактивности компонентов связанной системы. Чем меньше реактивность компонента, тем больше асимметрия флюенса нейтронов в нем. Полученный результат качественно можно объяснить следующим образом. При большой реактивности компонента, например ПС, энерговыделение в нем определяется в основном размножением на "собственных" нейтронах. Поэтому распределение потока нейтронов (активации) по радиусу ПС будет близко к распределению по собственной функции, т.е. симметричное. При малых значениях реактивности ПС энерговыделение в значительной мере определяется делениями, обусловленными нейтронами, прилетевшими из АЗ БИР. Это приводит к увеличению плотности делений в части ПС, обращенной к АЗ, т.е. к асимметрии потока нейтронов.

Измерение временных характеристик размножения мгновенных нейтронов

В отличие от изолированного реактора без отражателя, в котором цепная реакция характеризуется одной временной постоянной, в системе связанных реакторов могут иметь место следующие основные разновидности цепочек делений:

- начавшиеся в АЗ (ПС) и закончившиеся в АЗ (ПС);
- начавшиеся в АЗ (ПС) и закончившиеся в ПС (АЗ);
- начавшиеся в АЗ (ПС), продолжившиеся в ПС (АЗ) и закончившиеся в АЗ (ПС).

Временные характеристики всех разновидностей цепочек и их относительное количество зависят от конфигурации связанной системы, состава и реактивности компонент.

Для получения спада плотности мгновенных нейтронов использовалась "старт/стопная" разновидность α -Росси эксперимента, которая для достаточно быстрых реакторов эквивалентна классическому α -Росси эксперименту [5]. Из всей цепочки делений регистрировались практически только два деления - детектором "старт" и детектором "стоп". В зависимости от того, где располагались детекторы, регистрировался тот или другой тип цепочки делений. Для задан-

ного состояния системы производились измерения при следующих расположениях детекторов:

- старт АЗ - стоп АЗ; старт ПС - стоп ПС;
- старт АЗ - стоп ПС; старт ПС - стоп АЗ.

Для каждой геометрии связанной системы производились измерения при нескольких значениях реактивности.

В качестве детектора нейтронов был выбран борный счетчик СНМ-14. Два идентичных измерительных канала состояли из следующих элементов: счетчик СНМ-14 в чехле из кадмия; предварительный усилитель, работающий в режиме усиления по току; усилитель; временной анализатор.

Связанные системы без замедлителя в составе ПС (АЗ-ПС-1 и АЗ-ПС-4) характеризуются экспоненциальной зависимостью спада плотности мгновенных нейтронов. Для связанных систем, содержащих ПС с замедляющей оболочкой (АЗ-ПС-2 и АЗ-ПС-3), наблюдалась более сложная зависимость этой характеристики, которая может быть представлена двумя или тремя экспонентами.

Измеренные значения постоянных спада нейтронов в ПС составляют, мкс^{-1} : в ПС-1 $7,3 \pm 1,3$; в ПС-2 $2,2 \pm 0,3$; в ПС-3 $2,4 \pm 0,2$; в ПС-4 $1,55 \pm 0,03$. Сборки с отражателем содержат также медленную составляющую спада плотности нейтронов. Ее постоянная времени равна, мкс^{-1} : в ПС-2 $0,20 \pm 0,03$; в ПС-3 $0,17 \pm 0,02$.

На рис. 5 представлены зависимости постоянных спада мгновенных нейтронов от реактивности при различных расположениях детекторов в связанной системе. Для систем АЗ-ПС-2 и АЗ-ПС-3 приведены постоянные, характеризующие лишь наиболее быстрый участок спада плотности мгновенных нейтронов.

Таблица к рис. 5

Обозначение	Схема регистрации
○ ○ ●	Старт АЗ - стоп АЗ
□ □ ■	Старт ПС - стоп ПС
▽ ▽ ▽	Старт АЗ - стоп ПС
△ △ △	Старт ПС - стоп АЗ
---	Изолированный БИР
○ □ ▽ △	$R = 380 \text{ мм}$ (388 мм для ПС-2)
○ □ ▽ △	$R = 550 \text{ мм}$
● ▽ △	$R = 865 \text{ мм}$

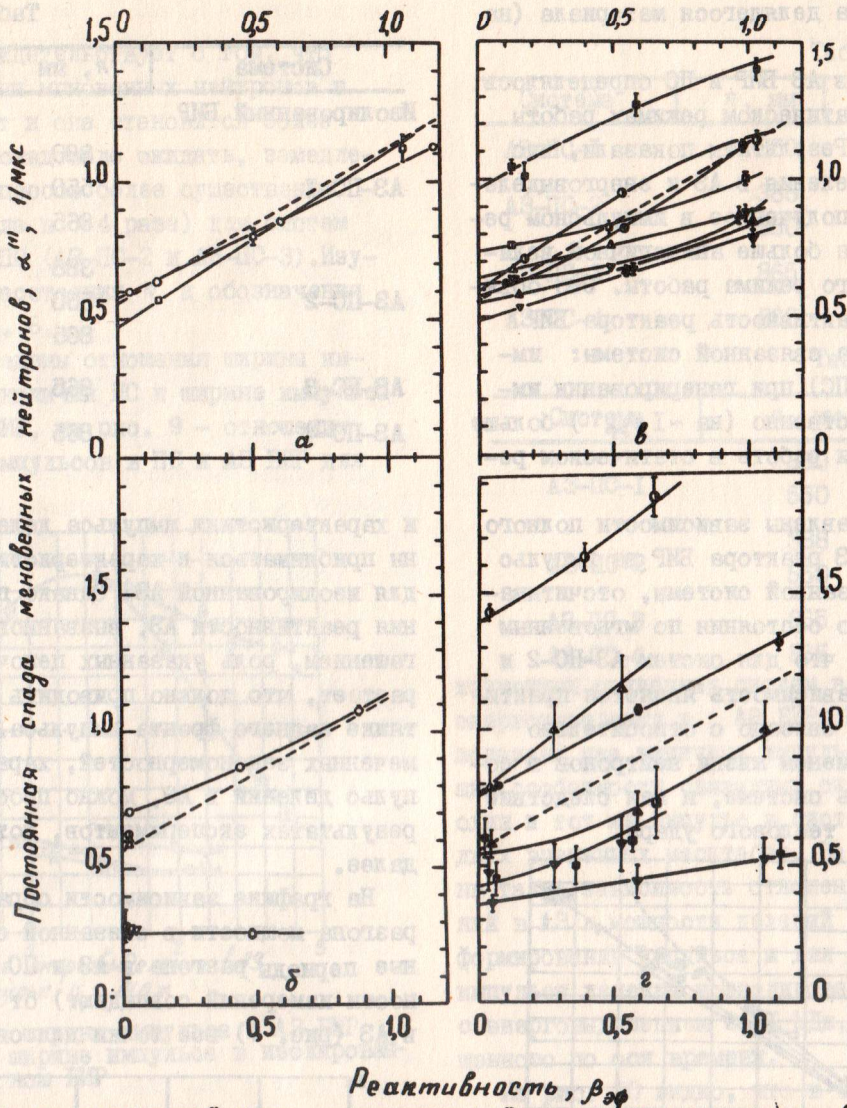


Рис. 5. Зависимость постоянной спада мгновенных нейтронов от реактивности (для АЗ-ПС-2 и АЗ-ПС-3 - представленные данные характеризуют начальный, наиболее крутой участок спада плотности мгновенных нейтронов); а - АЗ-ПС-1; б - АЗ-ПС-2; в - АЗ-ПС-4; г - АЗ-ПС-3

Исследование характеристик импульсов делений

Основные параметры импульсов делений в связанных системах приведены в табл. 3.

Как правило, для каждой связанной системы производилось несколько импульсов, различающихся энерговыделением. Энерговыделение в импульсах изменялось от 0,8 до 2,8 МДж. Максимальное энерговыделение в ПС ограничивалось допустимой температурой топливного материала ($T < 100^{\circ}\text{C}$) и возможным разлетом ее деталей, обусловленным тепловым ударом. Энерговыделение в АЗ реактора БИР определялось активацион-

ными датчиками из никеля, устанавливаемыми в центральном канале АЗ, и штатными термопарами, прокалиброванными ранее в мегаджоулях. В пределах точности измерений ($\sim 3\%$, 1σ) оба метода дают совпадающие результаты.

Способ определения энерговыделения в ПС состоял в измерении установившейся температуры топливного материала, которая в дальнейшем пересчитывалась на величину выделенной энергии. Измерения температуры производились с помощью калиброванных хромель-алюмелевых термопар, устанавливаемых на внутренней и наружной поверхности ПС. В ПС-2 и ПС-3, кроме того, термопары устанавливались также в области мая

симального разогрева делящегося материала (на диаметре 217 мм).

Энерговыведение в АЗ БИР и ПС определялось при импульсном и статическом режимах работы связанной системы. Результаты показали, что отношение энерговыведения в АЗ к энерговыведению в ПС (q_1/q_2), полученное в импульсном режиме, в 1,6–1,8 раза больше аналогичной величины для статического режима работы. Это объясняется тем, что реактивность реактора БИР (ведущего компонента связанной системы: импульсный реактор + ПС) при генерировании импульса делений существенно (на $\sim 1\beta_{эф}$) больше его реактивности при работе в статическом режиме.

На рис. 6 представлены зависимости полного энерговыведения в АЗ реактора БИР за импульс от реактивности связанной системы, отсчитываемой от критического состояния по мгновенным нейтронам. Отметим, что для систем АЗ-ПС-2 и АЗ-ПС-3 указанная зависимость является практически линейной. Это связано с относительно большим средним временем жизни нейтронов в содержащей замедлитель системе, и как следствие этого – отсутствием теплового удара.

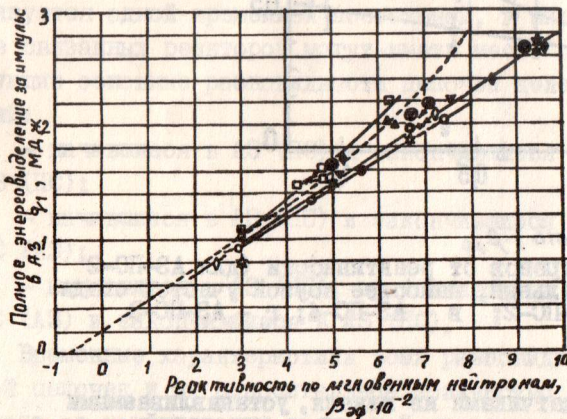


Рис. 6. Зависимость полного энерговыведения в АЗ БИР за импульс от реактивности по мгновенным нейтронам

Формирование импульса делений в связанной системе в значительной мере определяется наличием цепочек делений, общих для АЗ и ПС. По этой причине характеристики импульса в АЗ зависят от доли делений в АЗ, вызванных общими для АЗ и ПС цепочками, и от временных постоянных этих цепочек. Эти величины существенно изменяются при изменении геометрии связанной системы и реактивности изолированной АЗ. В частности, при увеличении реактивности АЗ роль цепочек делений, общих для АЗ и ПС, уменьшается,

Таблица к рис. 6

Система	R, мм	Обозначение
Изолированный БИР		---
	380	○
АЗ-ПС-1	550	△
	865	⊗
	388	◇
АЗ-ПС-2	550	▽
	865	⊙
АЗ-ПС-3	865	★
АЗ-ПС-4	865	□

и характеристики импульса делений в АЗ должны приближаться к характеристикам импульсов для изолированной АЗ. Однако по мере уменьшения реактивности АЗ, вызванного температурным гашением, роль указанных цепочек делений возрастает, что должно приводить к некоторой затяжке заднего фронта импульса. Проявление отмеченных закономерностей, характеризующих импульс делений в АЗ, можно проследить на результатах экспериментов, которые приводятся далее.

На графике зависимости обратного периода разгона мощности в связанной системе (начальные периоды разгона в АЗ и ПС в пределах точности измерений совпадают) от энерговыведения в АЗ (рис. 7) все точки для связанных систем

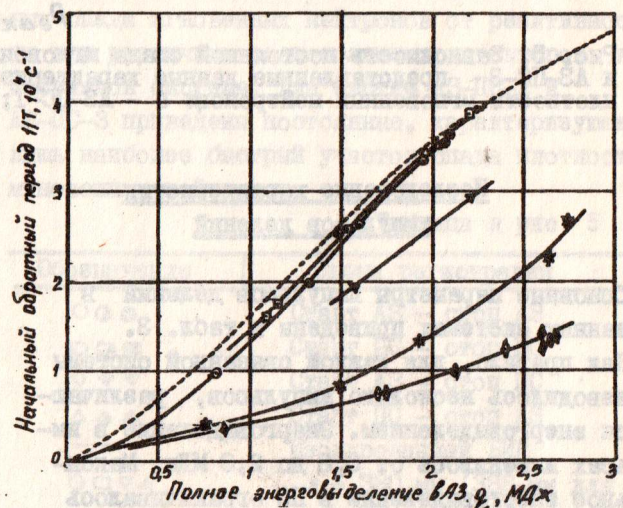


Рис. 7. Зависимость начального обратного периода от энерговыведения в АЗ БИР

расположены ниже точек для изолированного реактора БИР, если энерговыведение за импульс

одинаково. Это свидетельствует о том, что среднее время жизни мгновенных нейтронов в системе возрастает и она становится более медленной. Как и следовало ожидать, замедленные временных процессов более существенно (увеличение периода в ~4 раза) для систем с замедлителем в ПС (АЗ-ПС-2 и АЗ-ПС-3). Изученные системы, расстояния R и обозначения соответствуют рис. 6.

На рис. 8 приведены отношения ширины импульса в БИР при наличии ПС к ширине импульса в изолированном БИР, на рис. 9 – отношения значений ширины импульсов в ПС и АЗ БИР для

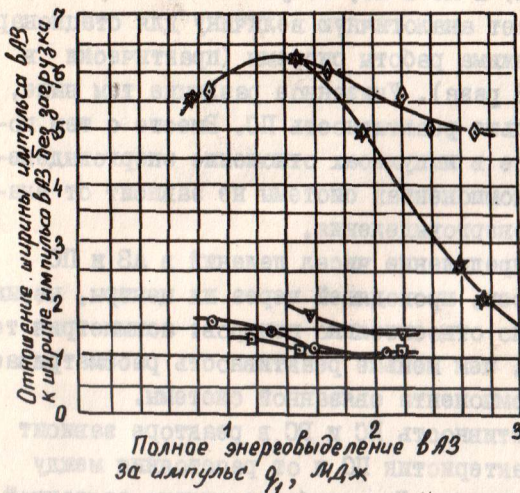


Рис. 8. Отношение ширины импульса в АЗ БИР при наличии ПС к ширине импульса в изолированном БИР

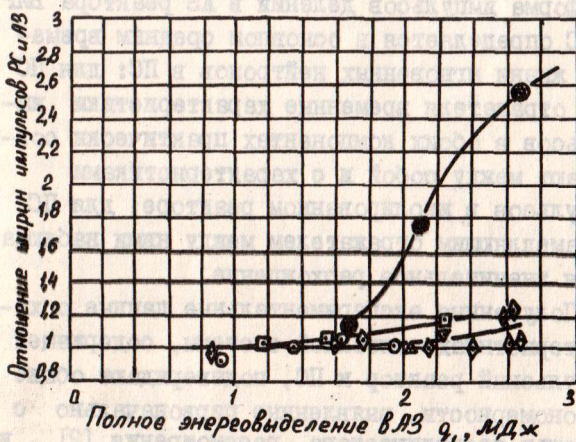


Рис. 9. Зависимость отношения ширины импульсов в ПС и АЗ БИР от энерговыделения в АЗ БИР за импульс

Таблица к рис. 8

Система	R , мм	Обозначение
АЗ-ПС-1	380	○
АЗ-ПС-2	388	◇
	550	▽
АЗ-ПС-3	865	⊙
АЗ-ПС-4	865	□

Таблица к рис. 9

Система	R , мм	Обозначение
АЗ-ПС-1	380	○
	550	△
АЗ-ПС-2	388	◇
	550	▽
АЗ-ПС-3	865	⊙
АЗ-ПС-4	865	□

изученных связанных систем в зависимости от энерговыделения в АЗ БИР. На рис. 10 и 11 показаны два типичных импульса, иллюстрирующих особенности связанных систем. На рис. 10 один и тот же импульс в системе изображен в двух временных масштабах. На рис. 11 приведены также зависимость отношения мощности делений в АЗ к мощности делений в ПС в процессе формирования импульса и для сравнения форма импульса делений в изолированном реакторе БИР с энерговыделением 2,61 МДж, искусственно смещенного по оси времени.

Из рис. 10 видно, что в системе АЗ-ПС-4 ($R = 865$ мм) формы импульсов в АЗ и ПС совпадают. Если сравнить основные характеристики импульсов в АЗ, входящей в состав этой связанной системы, с характеристиками импульсов делений для изолированного реактора БИР (при одинаковом энерговыделении), то окажется, что они также совпадают. Осцилляции мощности в АЗ и ПС одинаковы по форме, а период осцилляций (~200 мкс) совпадает с аналогичной величиной для изолированного реактора БИР.

В связанной системе наблюдается (см. рис. 11) уширение импульса в АЗ БИР по сравнению с изолированным реактором в ~1,6 раза. При этом отношение ширины импульса в ПС к ширине импульса в АЗ равно 2,6, а отношение мощностей n_1/n_2 за время импульса изменяется в 4,2 раза. АЗ испытывает тепловой удар, о чем сви-

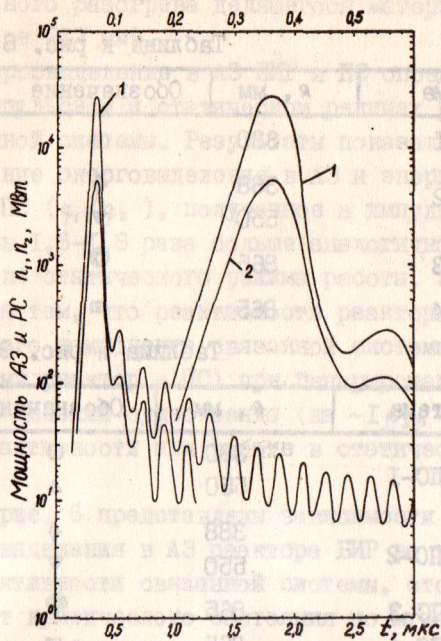


Рис. 10. Импульсы делений в АЗ (1) и ПС-4 (2) для связанной системы БИР-ПС-4 при $r = 865$ мм: $q_1 = 2,22$ МДж; $q_2 = 0,51$ МДж

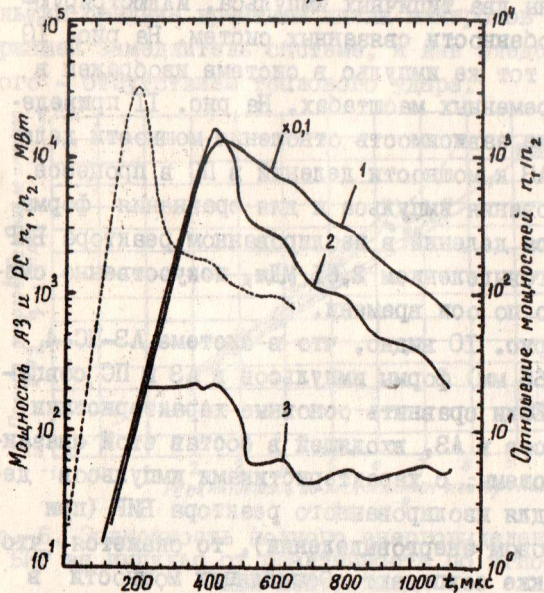


Рис. 11. Импульсы делений в АЗ (1) и ПС-3 (2) и отношение мощностей (3) для связанной системы БИР-ПС-3 при $r = 865$ мм: $q_1 = 2,68$ МДж; $q_2 = 0,51$ МДж; --- для изолированного БИР, $q = 2,61$ МДж

детельствуют осцилляции мощности на заднем фронте импульса с периодом ~ 200 мкс, осцилляции мощности в ПС выражены существенно слабее.

Сдвиг во времени вершин импульсов в АЗ и ПС, как правило, невелик для всех изученных систем. Наиболее сильно этот сдвиг проявля-

ется в системе АЗ-ПС-3 при $r = 865$ мм. Максимальное значение отношения указанного сдвига к ширине импульса в ПС составляет 0,15.

Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено следующее.

В пространстве между компонентами связанных систем реализуется довольно обширная (длинной ~ 500 мм) область с примерно однородным флюенсом нейтронов, что имеет важное значение для облучательных опытов. Практически было получено значение флюенса $1 \cdot 10^{13}$ нейтр/см².

Отношение флюенсов нейтронов (или энерговыделений) в АЗ и ПС, получаемое в импульсе, превышает аналогичную величину для стационарного режима работы системы (практически в 1,6–1,8 раза). Указанное различие тем выше, чем больше реактивность ПС. Вместе с тем получаемое в импульсах отношение энерговыделений в компонентах системы не зависит от значения энерговыделения.

Распределение чисел делений в АЗ и ПС вдоль оси, проходящей через их центры, несимметрично относительно центров: асимметрия тем больше, чем меньше реактивность рассматриваемого компонента связанной системы.

Реактивность ИС и ПС в реакторе зависит от характеристик ПС и от расстояния между компонентами. Для наиболее сильно связанной системы из изученных указанная величина может изменяться в два раза по сравнению с изолированным реактором.

Форма импульсов делений в АЗ реактора БИР и ПС определяется в основном средним временем жизни мгновенных нейтронов в ПС: для ПС без отражателя временные характеристики импульсов в обоих компонентах практически совпадают между собой и с характеристиками импульсов в изолированном реакторе, для ПС с замедляющим отражателем между ними наблюдается значительное расхождение.

Полученные экспериментальные данные о характеристиках связанной системы, содержащей импульсный реактор и ПС, подтверждают общие закономерности, выявленные первоначально с помощью теоретического рассмотрения [2], и дают основание сделать заключение о том, что использование связанных систем позволяет изменять в широких пределах временные характеристики импульса делений, отношения энерговыделений и мощностей в реакторе и ПС.

Список литературы

1. Колесов В.Ф. Импульсные реакторы самогасящего действия и методы их расчета. Часть I (обзор) // ВАНТ. Сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки. 1985. Вып. I. С. 43-77.

2. Колесов В.Ф., Петров Ю.В., Штарев С.К. Кинетика системы связанных импульсных реакторов // Атомная энергия. 1975. Т. 39. Вып. 6. С. 392-396.

3. Харитон Ю.Б., Воинов А.М., Колесов В.Ф. и др. Аperiodические исследовательские импульсные реакторы // Вопросы современной экспериментальной и теоретической физики. Л.: Наука, 1984. С. 103-119.

4. S j o s t r a n d N. Measurements on a subcritical reactor, using a pulsed neutron source // Arkiv Fys. 1956. Vol. 11, N 3 P. 233-246.

5. B a b a l a D. Point-reactor theory of Rossi-alpha experiment // Nucl.Sci.Eng. 1967. Vol. 28. P. 237-242.

Статья поступила в редакцию 22.02.88.