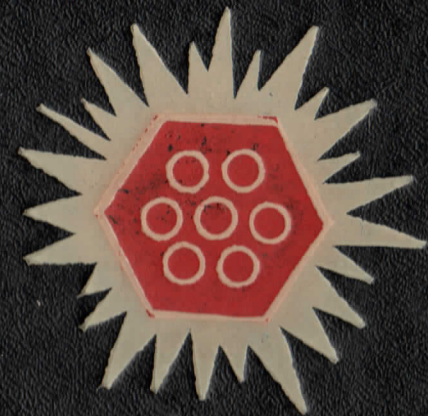


Е.П. ШАБАЛИН

**ИМПУЛЬСНЫЕ
РЕАКТОРЫ**

**на быстрых
нейтронах**



Шабалин Е. П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. М., Атомиздат, 1976, с. 248.

В книге обобщается большой материал теоретического и экспериментального характера, накопленный в СССР, США и других странах почти за 20-летний период эксплуатации импульсных реакторов на быстрых нейтронах как периодического, так и аperiodического действия. Последовательно излагается нейтронная кинетика импульсных реакторов и бустеров; подробно рассматривается проблема теплового удара; дается детальный анализ флуктуаций нейтронного потока в импульсных реакторах. В последней главе читатель знакомится с применением импульсных реакторов и бустеров в физических исследованиях.

Книга может стать рабочим материалом для инженеров и научных сотрудников, специализирующихся на проектировании и эксплуатации исследовательских реакторов и мощных нейтронных источников на основе реакции деления.

Рисунков 78, таблиц 17, список литературы 188 названий.

ПРЕДИСЛОВИЕ

20 лет прошло с того времени, когда приступили к разработке первого импульсного реактора периодического действия ИБР (1956 г.), и почти 20 лет с тех пор, как начал работать первый импульсный реактор самогасящего действия Codiva II (1957 г.). Тогда я был еще студентом, и только впоследствии мне посчастливилось узнать создателей этих реакторов: Д. И. Блохинцева, Ю. Я. Стависского, И. И. Бондаренко, Т. Уиметта, О. Фриша, Г. Хансена и др. — и познакомиться с некоторыми из них. Эта книга, в которой обобщен опыт проектирования и эксплуатации импульсных реакторов за два десятилетия, появилась на свет прежде всего благодаря трудам этих ученых.

В книге использовано много материала, полученного за время эксплуатации ИБР и ИБР-30 и проектирования ИБР-2 сотрудниками Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований В. Т. Руденко, В. Д. Ананьевым, Б. Н. Буниным, А. Д. Роговым, А. К. Поповым и др. Некоторые малоизвестные материалы об импульсных реакторах самогасящего действия были любезно присланы Р. Л. Лонгом.

При обсуждении рукописи ряд полезных замечаний сделали И. М. Франк, Е. Д. Воробьев, Ю. С. Язвickий, В. Д. Ананьев; большую помощь мне на протяжении всей работы над книгой оказали дискуссии с В. Л. Ломидзе, а также постоянное внимание Д. И. Блохинцева и его одобрение этой работы.

Я благодарю всех, в том числе и не упомянутых здесь, кто в той или иной мере способствовал созданию рукописи и из-

данию книги, надеюсь, что она будет полезна и интересна как начинающим инженерам-физикам, так и опытные специалистам.

Конечно, мой первый опыт литературной работы не лишен недостатков, и я буду весьма признателен за все замечания, высказанные по содержанию книги.

Е. ШАБАЛИН

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

- ИРСД — импульсный реактор самогасящего действия
ИРПД — импульсный реактор периодического действия
БР — бустер реактивности
ИЗН — источник запаздывающих нейтронов
МР — модулятор реактивности
ОМР — основной МР
ДМР — дополнительный МР
ПО — подвижный отражатель
 A_T — температурный коэффициент реактивности в единицах реактивности на градус
 A_f — то же в единицах реактивности на одно деление
 $B = \epsilon_m^{3/2} / (\alpha^{1/2} v \tau)$ — безразмерный параметр ИРПД
 C_i — количество ИЗН i -й группы в реакторе
 c — скорость звука
 E — модуль Юнга
 E — энергия нейтрона
 H_x, H_y, H_z — размеры подвижного отражателя
 k^1 — коэффициент размножения нейтронов в реакторе
 $k_p = k(1 - \beta)$ — коэффициент размножения на мгновенных нейтронах
 k_n — импульсный коэффициент размножения
 L — длина сердечника твэла
 M — фактор умножения нейтронов в импульсе; отношение энергии импульса к интенсивности источника нейтронов
 M_n — «качество» нейтронного спектрометра
 N — мощность реактора или интенсивность генерации нейтронов в реакторе
 N_m — мощность в пике импульса
 N_p — мощность на плато импульса (после вспышки)
 N_{Φ} — фоновая мощность ИРПД (между вспышками)
 N — средняя мощность ИРПД
 N_0 — средняя мощность в основных импульсах
 N_n — то же в побочных импульсах
 $n(t)$ — количество нейтронов в реакторе; популяция нейтронов
 $n_p = 1/T_p$ — частота вспышек мощности ИРПД
 n_o — частота пульсаций ОМР
 Q — энергия, выделенная в реакторе
 Q_0 — то же за время быстрой части импульса
 Q_{∞} — то же за время всего импульса
 Q_m — то же к моменту максимума мощности
 Q_T — то же за один период пульсации ИРПД
 R — радиус сферы, цилиндра или оболочки

S — интенсивность источника нейтронов
 ds — элемент площади поверхности
 $T(x, t)$ — температура топлива импульсного реактора
 T_0 — подогрев топлива за время быстрой части импульса
 ΔT — то же за весь импульс
 T_p — период пульсации мощности в ИРПД
 u — смещение точек топлива при нагреве во время импульса
 W_s, W_f — дифференциальные сечения рассеяния и деления
 y — отношение длительности импульса тепловыделения к периоду собственных колебаний реактора
 α_0 — обратный начальный период разгона ИРСД
 α — коэффициент параболы реактивности МР
 β — доля запаздывающих нейтронов на 1 нейтрон деления
 β_i — то же для i -й группы
 $\beta_{эф}$ — эффективная доля запаздывающих нейтронов в критическом реакторе
 $\beta_{и}$ — импульсная доля запаздывающих нейтронов
 γ — скорость введения реактивности бустером в ИРСД или скорость введения реактивности при $\epsilon=0$ в ИРПД
 γ_{ij} — относительная механическая жесткость
 $\epsilon = k(1-\beta)$ — реактивность на мгновенных нейтронах
 ϵ_m — то же в максимуме импульса реактивности
 $\epsilon_{ф}$ — то же между вспышками ИРПД
 ϵ_0 — начальная реактивность ИРСД
 θ — длительность импульса мощности реактора
 $\theta_{1/2}$ — длительность импульса на половине высоты, полуширина импульса
 $\theta_{эф} = Q_0/N_m$ — эффективная длительность
 κ — коэффициент линейного расширения
 λ_i — постоянная распада ИЗН i -й группы
 μ_x, μ_y, μ_z — направляющие косинусы
 μ — коэффициент Пуассона
 ν — число мгновенных нейтронов на одно деление
 ρ — плотность
 σ — механическое напряжение
 Σ_x — макросечение
 τ — среднее время жизни «ценности» мгновенного нейтрона; время жизни поколения нейтронов
 φ — плотность потока нейтронов
 φ_m — то же в пике импульса
 $\varphi_{и}$ — средняя по времени плотность потока нейтронов в ИРПД
 $\varphi_{ст}$ — то же в стационарном реакторе
 Δk_{MR} — глубина модуляции реактивности в ИРПД, эффективность МР
 ω — круговая частота
 Ω — телесный угол

ВВЕДЕНИЕ

Импульсный реактор — «устройство, обеспечивающее получение контролируемых и повторяемых вспышек деления атомных ядер»*. Этому определению удовлетворяют три типа ядерных устройств, функционирующих в настоящее время:

1. Импульсные реакторы аperiodического действия, в которых вспышка делений инициируется быстрым введением избыточной реактивности с переводом реактора в надкритическое состояние по мгновенным нейтронам, а гасится за счет отрицательной обратной связи температура — реактивность. В дальнейшем эти реакторы называются *импульсными реакторами самогасящего действия* (в соответствии со статьей БСЭ), сокращенно — ИРСД, в западной литературе — fast burst reactor.

2. Импульсные реакторы периодического действия (ИРПД), в которых вспышки делений целиком формируются внешней модуляцией реактивности с заданным периодом. В книге Г. А. Батя, А. С. Коченова и Л. П. Кабанова «Исследовательские ядерные реакторы» [1] такие установки называются *пульсирующими реакторами*. Последнее название более соответствует сути этого типа ядерных устройств и отражает тот факт, что ИРПД по теплофизическим и динамическим свойствам стоят много ближе к реакторам со стационарным потоком, чем к ИРСД. Но автор сохраняет терминологию, установившуюся до выхода в свет вышеуказанной книги.

3. Бустеры — реакторы, находящиеся в подкритическом состоянии на мгновенных нейтронах, импульс мощности в которых развивается за счет размножения нейтронов внешнего импульсного источника (периодического или непериодического), главным образом мишени электронных ускорителей.

История импульсных реакторов началась во времена Манхэттенского проекта, когда в январе 1945 г. под руководством Отто Фриша в лабораториях Лос-Аламоса была осуществлена первая контролируемая цепная реакция деления на мгновенных

* Определение принадлежит В. Ф. Колесову, автору многих работ в области физики импульсных реакторов (см. список литературы к гл. 2, 3).

нейтронах [2]. Подвижная часть реактора была подвешена с помощью электромагнита в верхней части фермы высотой около 6 м, а неподвижная часть активной зоны покоилась у основания фермы. При выключении электромагнита кусок урана, падая сверху, скользил по направляющим и со скоростью, близкой к скорости свободного падения, пролетал мимо основной активной части в непосредственной близости от нее. Весь ансамбль настраивался так, чтобы максимальное значение коэффициента размножения с учетом только мгновенных нейтронов деления было больше единицы. По форме нейтронного импульса, который развивался при пролете подвижной части мимо неподвижной, экспериментаторам удалось оценить время жизни нейтронов деления. Эти опыты с легкой руки остроумного Р. Фейнмана, который метафорически сравнивал их со «щекотанием хвоста спящего дракона», получили условное наименование «Дракон»*.

«Его величество случай» дал толчок к созданию большой серии импульсных реакторов на быстрых нейтронах, генерирующих импульсы мощности на другом принципе — за счет самогашения реакции деления. В 1952 г. в Лос-Аламосской научной лаборатории (США) произошел незапланированный разгон на мгновенных нейтронах «голой» урановой сборки «Jemima» [3]. Энергия аварийной вспышки была $1,5 \cdot 10^{16}$ делений. Ни одна из систем сборки не пострадала, никто не облучился, и не произошел выброс радиоактивных продуктов. Этот прецедент выявил самогасящее свойство малых металлическихборок и стимулировал модификацию имевшейся уже сборки Godiva I («Леди Годива») для производства коротких мощных нейтронных вспышек. Такой режим работы реактора напоминает миниатюрный атомный взрыв и очень удобен для изучения радиационных повреждений и характера облучения местности. Но ИРСД стали применяться не только в военных целях. Малая длительность импульса самогасящего реактора на быстрых нейтронах в сочетании с большой интенсивностью определила весьма широкую область использования его как источника нейтронов и γ -квантов для исследований короткоживущих активных изотопов, быстропеременных радиационных повреждений в материалах, электронных приборах, биологических структурах. Благодаря небольшому размеру ИРСД очень удобны для облучения образцов любого размера во внешнем поле радиации. Большое значение для точности экспериментов имеет хорошая воспроизводимость вспышек мощности реактора.

Первый реактор, использованный для генерирования коротких вспышек делений, Godiva I [4] представлял собой шар из металлического урана, обогащенного на 93% изотопом

* Работы по программе «Дракон» были рассекречены только в 60-х годах после официального сообщения о пуске импульсного реактора ИБР с механической модуляцией реактивности.

^{235}U (50 кг); одна из двух полусфер реактора была подвижной, и надкритичность достигалась быстрым соединением полусфер. Характеристики импульса реактора Godiva I были следующими:

Число делений за импульс	$1,5 \cdot 10^{16}$
Длительность импульса нейтронов на половине высоты («полуширина импульса»)	50 мкс
Флюенс нейтронов на внешней границе активной зоны (за один импульс)	$2 \cdot 10^{13}$ нейтр./см ²

Начиная с 1957 г., когда вступил в эксплуатацию реактор Godiva II [5], специально сконструированный для работы в режиме аperiodически повторяющихся вспышек мощности на мгновенных нейтронах, и до настоящего времени изготовлено и пущено в эксплуатацию около 20 ИРСД на быстрых нейтронах — в США, Англии, ФРГ, Японии и других странах. В первых американских ИРСД (Godiva II, Kukla, SPR I, FRAN) [6], построенных до 1962 г., используется чистый уран в качестве горючего, что ограничивает энергию вспышек ($Q_0 < 3 \cdot 10^{16}$ делений) и ресурс работы реактора из-за вредного влияния теплового удара. Дело в том, что быстрый нагрев топлива на $100\text{--}300^\circ\text{C}$ приводит к значительным инерциальным нагрузкам и, как следствие, к износу и коррозии топлива и конструкционных материалов.

В более поздних ИРСД, относящихся ко второму поколению, используются сплавы урана с молибденом (от 1,5 до 10% Mo по массе), которые значительно прочнее и стабильнее чистого, нелегированного урана. Для реакторов второго поколения (HPRR, Molly-G, Super, Kukla, Godiva IV, SPR II, SPR III, APRFR, Caliban, VIPER) [6—8]* характерно наличие большой внутренней полости для облучения, которая в реакторе Super Kukla достигает 56 см в высоту и 45 см в диаметре. В отличие от Godiva I во всех ИРСД имеется комплект импульсных регулирующих стержней и стержней безопасности, обеспечивающий хорошую точность и воспроизводимость параметров импульса.

Типичные характеристики современного ИРСД:

Число делений в импульсе	$10^{17}\text{--}10^{18}$
Полуширина импульса	25—700 мкс
Флюенс быстрых нейтронов в полости	$(1\text{--}2) \cdot 10^{15}$ нейтр./см ²
Нагрев топлива за вспышку	150—500 °C
Ресурс работы	Несколько тысяч импульсов

В настоящее время достигнут технический «потолок» параметров ИРСД на быстрых нейтронах традиционной конструкции в виде набора металлических урановых дисков (или цилиндрических твэлов). ИРСД третьего поколения, появление которых ожидается в 80-х годах, будут иметь разрушающуюся

* См. список литературы к гл. I.

активную зону с последующей ее регенерацией. Это позволит увеличить энергию вспышек на два порядка.

С начала 60-х годов получили распространение импульсные аperiodические реакторы самогасящего действия на тепловых нейтронах. Характерная особенность таких реакторов — глубокая отрицательная обратная связь, что делает их более безопасными в эксплуатации по сравнению с реакторами на быстрых нейтронах. Однако импульс мощности вследствие большого времени диффузии тепловых нейтронов на два и более порядков продолжительнее импульса мощности в ИРСД на быстрых нейтронах.

Наиболее многочисленное семейство составляют импульсные реакторы на тепловых нейтронах бассейнового типа — TRIGA, SPERT, PULSTAR и др. [7, 9—11]. Общее число реакторов типа TRIGA, которые используются во многих странах мира, в том числе и в развивающихся странах Африки и Азии, — более 40. Реактор TRIGA I достиг критичности в 1958 г. в лаборатории Гопкинса (США) [7]; он имеет цилиндрический твэл из тройного сплава уран—цирконий—водород. Реактор обладает большим, практически мгновенным отрицательным температурным коэффициентом, что и обусловило его широкое использование для получения мощных аperiodических вспышек делений, хотя первоначально он создавался для работы только в режиме постоянной мощности.

На реакторах бассейнового типа изучается динамика реакторов при введении больших избыточных реактивностей, проводятся испытания твэлов и другие материаловедческие испытания, производятся радиоактивные изотопы. Вследствие высокой степени безопасности эти реакторы очень популярны в учебных университетских курсах по кинетике и управлению ядерными установками. Характерные параметры реакторов бассейнового типа:

Энергия вспышки . . . 20 ÷ 80 МДж (0,5 ÷ 2,0 · 10¹⁸ дел.)
Полуширина вспышки 5 ÷ 10 мс

Гомогенные графитовые реакторы на тепловых нейтронах генерируют самый мощный импульс делений из всех созданных к настоящему времени устройств, не считая атомных бомб, — до 10²⁰ делений. Флюенс тепловых нейтронов за вспышку достигает 10¹⁷ нейтр./см². По конструкции и принципу действия американские реакторы TREAT и FLESH и советский реактор ИГР близки [1, 7, 10, 12, 13]. Активной зоной является прямоугольная призма графитовой кладки с диспергированным в графите ураном. Импульс инициируется быстрым выведением блока поглощающих стержней (TREAT) или вводом подвижной части активной зоны (ИГР), а гасится за счет уменьшения эффективных нейтронных сечений с повышением температуры нейтронного газа. Нагрев графита за импульс достигает 2000°С; охлаж-

дается зона после импульса в течение суток. Длительность вспышки в режиме самогашения ~ 0,1 с. ИГР предназначается также для создания управляемого извне импульса длительностью до нескольких секунд.

Наиболее прост по конструкции импульсный реактор на тепловых нейтронах растворного типа, представляющий собой цилиндрический сосуд с толстыми стенками, заполненный частично раствором урановых солей в обычной воде. В 50-х годах в США были созданы реакторы KEWB [7, 14]; в СССР в 1964 г. был построен растворный реактор ВИР-1, а в 1965 г. — ИИН [1, 15]*. Параметры импульса растворных реакторов следующие:

Число делений 10¹⁸
Полуширина 3 мс
Температура активной зоны 100°С

Для растворных реакторов характерна малая критическая загрузка, составляющая ориентировочно 5 кг ²³⁵U.

Хотя общее число импульсных реакторов на тепловых нейтронах, в предлагаемой вниманию читателя книге обсуждаются только последние. Дело в том, что в учебном пособии [1] весьма подробно и полно изложена физика и техника импульсных графитовых и растворных реакторов, а также реакторов бассейнового типа. Импульсные же реакторы на быстрых нейтронах еще не были предметом внимательного рассмотрения в отечественной литературе.

Главное внимание в книге уделено импульсным реакторам на быстрых нейтронах периодического действия, область использования которых — экспериментальная ядерная физика и физика твердого тела с применением нейтронной спектроскопии по времени пролета**.

В качестве источника нейтронов для нейтронной спектроскопии начиная уже с 40-х годов использовались ядерные реакторы постоянной мощности. Метод времени пролета требует источника нейтронов импульсного типа с длительностью импульса порядка 100 мкс и менее. Поэтому на стационарных реакторах осуществлялась модуляция потока нейтронов вращающимися механическими прерывателями и использовалась только малая часть нейтронов от генерированных реактором.

Реакторы на быстрых нейтронах типа Godiva, хотя и имеют достаточно короткую вспышку мощности, не годятся для целей нейтронной спектроскопии по той причине, что за весь срок службы производится всего около 10²⁰ нейтронов. Реактор ста-

* Во Франции в 1975 г. пущен в эксплуатацию растворный импульсный реактор SILENE.

** См. списки литературы к гл. 4 и 10.

ационарного действия производит такое же количество нейтронов, даже с учетом низкой пропускной способности прерывателя, за несколько часов.

В 1955 г. Д. И. Блохинцев предложил идею импульсного реактора с периодической модуляцией реактивности вращением части активной зоны и отметил, что такой реактор сам является модулятором потока нейтронов во времени и не нуждается в прерывателях. Он сочетает в себе лучшие (в смысле применения к нейтронной спектроскопии) черты ИРСД и стационарного реактора — импульсный характер и высокий уровень средней интенсивности испускания нейтронов. КПД использования пучка нейтронов при нейтронной спектроскопии на таком реакторе близок к 100%. В Физико-энергетическом институте (ФЭИ) (г. Обнинск) была разработана приближенная теория импульсного реактора периодического действия [16, 17]; его проект для реализации в Дубне был создан совместными усилиями ученых ФЭИ и Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ).

В июле 1960 г. в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ, руководимой академиком И. М. Франком, начал работать ИБР — импульсный реактор на быстрых нейтронах периодического действия. Это был первый в мире реактор нового типа, в котором импульсы создавались периодически вращением части активной зоны. Полуширина импульса быстрых нейтронов в ИБР была около 40 мкс; частота повторения вспышек от 5 до 50 Гц. Средняя мощность, иначе говоря энергия, выделенная за период и отнесенная к длительности периода, в первые годы работы ИБР составляла 1 кВт. Мгновенная мощность в максимуме импульса при частоте повторения 5 Гц достигала 5 МВт. В сочетании с большой пролетной базой нейтронов — 1000 м — эти характеристики поставили спектрометр ИБР в один ряд с лучшими спектрометрами на стационарных реакторах. После усовершенствования системы охлаждения мощность реактора была повышена до 6 кВт. Были исследованы новые режимы работы импульсного реактора: с импульсами переменной амплитуды и с малой частотой следования импульсов, когда пиковая мощность достигала 500 МВт.

В 1969 г. ИБР был реконструирован; новый вариант реактора средней мощностью 25 кВт получил название ИБР-30. Особенностью ИБР-30 является наличие двух подвижных зон, что позволяет уменьшить тепловую нагрузку на каждую из них.

Реактор может работать в широком диапазоне частот повторения импульсов — от 100 импульсов в секунду до одиночных с энергией до $5 \cdot 10^{16}$ делений; полуширина импульсов составляет 55—60 мкс.

Простейший анализ качества импульсного источника нейтронов для спектрометрии по времени пролета показывает,

что

$$N(E) \sim \Phi(E)/(\Delta t)^2,$$

где $N(E)$ — интенсивность регистрации нейтронов при заданной неопределенности ΔE в энергии E ; $\Phi(E)$ — поток нейтронов источника в направлении на мишень в интервале энергий ΔE ; Δt — неопределенность времени пролета нейтронов, которая зависит главным образом от длительности импульса нейтронов источника. Формирование нужного для эксперимента нейтронного спектра обеспечивается обычно водяными замедлителями подходящего размера. Чем ниже энергия нейтрона, тем толще слой воды. Очевидно, что в хорошем спектрометре длительность импульса быстрых нейтронов собственно источника должна быть меньше неопределенности времени жизни нейтронов в водяном слое, чтобы не увеличилось суммарное значение Δt . ИБР наиболее эффективен в исследованиях с медленными нейтронами, так как время жизни тепловых нейтронов в слое воды оптимальной толщины составляет 50—70 мкс. ИБР оказался удобным инструментом для исследований структуры и динамики конденсированных сред с помощью нейтронов. Однако для нейтронов с $E > 1$ эВ неопределенность времени их миграции в воде равна $1,2/\sqrt{E}$ мкс, что значительно меньше длительности импульса нейтронов в реакторе. Источники на основе ускорителей имеют короткую длительность импульса, но небольшую интенсивность; для реактора картина обратная. В 1959 г. в английском исследовательском центре в Харуэлле впервые была реализована остроумная идея усиления нейтронных импульсов мишени ускорителя в подкритическом реакторе, позволившая использовать преимущества и ускорителя и реактора. Пучок электронов с энергией 15 МэВ падал на урановую мишень, охлаждаемую ртутью; одновременно мишень являлась подкритической сборкой с коэффициентом размножения 0,9. Генерируемые в мишени фотонейтроны умножались сборкой в 10 раз; длительность импульса составила 0,25 мкс [19].

И. М. Франк и Ф. Л. Шапиро предложили использовать идею бустера в импульсном реакторе ИБР — глубокая модуляция реактивности в ИБР позволяла достигать большого умножения на мгновенных нейтронах в импульсе. В стационарном же реакторе максимальное усиление нейтронов ограничивается критичностью на запаздывающих нейтронах и составляет для плутониевой зоны 30.

Инжектором для ИБР был выбран микротрон — миниатюрный ускоритель электронов до энергии 30 МэВ. Микротрон был разработан в Институте физических проблем С. П. Капцей с сотрудниками по идее В. И. Векслера; в Дубне в 1964 г. под руководством И. М. Маторы был создан вариант микротрона с большим током ускоренных электронов (до 80 мА),

достаточно стабильный в работе. Мишень из вольфрама диаметром 20 мм, установленная в активной зоне ИБР, служила конвертором электронов в нейтроны и генерировала 10^{10} нейтр./имп. при частоте 50 имп./с. Средняя мощность реактора при умножении 200 составила 1, 2 кВт; длительность импульса мощности — ~ 4 мкс. Таков был первый в мире импульсный бустер. Дальнейшее развитие импульсных бустеров идет по пути использования более мощных ускорителей и интенсификации охлаждения активной зоны.

Помимо описанной ранее харуэлльской установки существует несколько других бустеров без модуляции реактивности (не импульсных). Активные зоны отработанных ИРСД (SPRI, Kukla) используются в США как бустеры для исследований по кинетике размножающих систем и для целей ядерной физики. Большая критическая сборка БФС в г. Обнинске служит бустером с инжектором-микротроном при измерениях нейтронных спектров энергетических реакторов на быстрых нейтронах.

Несколько лет успешной работы ИБР стимулировали в ряде научных центров поиски новых возможностей импульсных реакторов. Первой публикацией о работах в этом направлении было сообщение из исследовательского центра Евратома в Испре (Италия) в 1965 г. [20]. Под руководством В. Раевского там велась разработка проекта импульсного реактора периодического действия с подвижным отражателем на среднюю мощность 1 МВт. Ориентация реактора — экспериментальные работы с медленными нейтронами, в основном по физике конденсированных сред. Проект, названный SORA, был готов в 1967 г.

В ОИЯИ работа над проектом мощного импульсного реактора периодического действия ИБР-2 началась в 1964 г. Для модуляции реактивности было решено использовать вращающийся отражатель, так как охлаждение подвижного вкладыша из урана при средней мощности 5—10 МВт практически неосуществимо. Использование подвижного стального отражателя вместо урана увеличило длительность импульса быстрых нейтронов до 90—100 мкс; однако большая средняя мощность (4—5 МВт), обеспеченная жидкометаллическим натриевым охлаждением активной зоны, компенсирует этот недостаток реактора. Сейчас заканчивается сооружение реактора в Дубне. Расчетные значения характеристик ИБР-2 и описание его конструкции приведены в гл. 4.

В Брукхейвенской национальной лаборатории (США) с 1966 г. разрабатывается мощный импульсный реактор периодического действия PFR. Его предполагаемая средняя мощность — 30 МВт; длительность импульса — 90 мкс; частота импульсов — 22 Гц [21].

В Индии ведутся работы по созданию импульсного реактора периодического действия небольшой мощности с воздушным охлаждением типа ИБР и ИБР-30.

В 1975 г. японский реактор на быстрых нейтронах YAYOI («Благополучие») с компактной активной зоной из металлического урана (критическая масса 28 кг) был реконструирован для работы в импульсном режиме и стал вторым в мире периодически пульсирующим реактором*. YAYOI оснащен пятью системами изменения реактивности и может работать не только в импульсном периодическом режиме, но также в режимах гармонических и негармонических колебаний мощности. Наименьшая длительность вспышки реактора — 58 мкс, частота пульсаций — $1 \div 15$ Гц, средняя мощность — 2 кВт. Реактор YAYOI используется для исследований по дозиметрии и физике защиты от нейтронов на ядерных и термоядерных реакторах, для решения задач реакторной физики, для исследования влияния быстрых нейтронов на свойства веществ, для медико-биологических исследований.

Другие ИРПД ориентированы на фундаментальные исследования по ядерной физике или физике конденсированных сред. Для расширения возможностей источника в активной зоне предусматривается установка мишеней электронов: бустерный режим работы импульсного реактора предполагается во всех проектах.

Заканчивая вводную часть книги, которая представляет собой краткий исторический обзор импульсных ядерных устройств, хочется выразить надежду на то, что импульсные реакторы еще не сказали своего последнего слова, что их история будет продолжена будущими поколениями реакторов, у которых расширятся возможности и области применения. Мы можем увидеть автомобили с двигателями на основе импульсных ядерных процессов [17], импульсные реакторы-лазеры [22], нейтронные микроскопы, работающие на ультрахолодных нейтронах из импульсных реакторов, и многое другое.

* 1. **Advanced Research Reactor Used for Basic Research in Japan.** — In: Proceedings of the 4-th ICP UAE. Vol. 7. Vienna, IAEA, 1971, p. 820. (A/CONF-49). Auth.: S. An e. a.

2. **Operational Experiences of YAYOI.** — In: Proceedings of US/Japan Seminar on Fast Pulse Reactors. Tokai, Japan, 19—23 January. 1976. Auth.: H. Wakabayashi, I. Saito, A. Furuhashi e. a.