

УДК 621.039

ПОВЫШЕНИЕ ВНУТРЕННЕЙ ЗАЩИТЫ ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА ПРОТИВ ОШИБОЧНЫХ ИЛИ ПРОТИВОПРАВНЫХ ДЕЙСТВИЙ

Снопков А.А., Марков В.Н., Горин Н.В. (РФЯЦ — ВНИИТФ)

Устойчивости ядерных реакторов против человеческих ошибок и противоправных действий всегда уделяли повышенное внимание, так как известно, что большинство аварий на реакторах объясняется человеческим фактором — ошибками операторов. Если обеспечить внутреннюю защиту реактора не только от ошибочных, но и от противоправных действий, в том числе даже персонала, обладающего наиболее полными знаниями и лучшими возможностями, то может быть создан относительно безопасный реактор, для которого последствия любых аварий будут локализованы в реакторном здании. Однако полная безопасность невозможна, тем более импульсного реактора, ибо он эксплуатируется в той области реактивности, которая является аварийной для других типов реакторов. Технические меры защиты частично могут быть использованы на тех импульсных реакторах, где процесс генерации импульса относительно медленный $\sim 0,1$ с. Однако для реакторов БАРС [1, 2], где генерация импульса происходит за десятки микросекунд, следует искать другие способы повышения безопасности. Один из них — режим «мощность» с сильным внутренним источником нейтронов. В настоящей статье рассмотрены физические процессы при работе двухзонного реактора БАРС-5 [2] в этом режиме, но без технических и конструктивных подробностей. Режим введен в эксплуатацию в 1989 г.

Серьезная ядерная авария на импульсном реакторе обусловлена вводом и реализацией в импульсе аварийно большой избыточной реактивности — реактивности выше мгновенной критичности. Известно, что ограничить ее реализацию можно лишь при наличии сильного внутреннего источника нейтронов, который может своевременно подключить защитный механизм — тепловое самогашение, что снижает тяжесть аварийной ситуации и повышает самозащиту реактора. Внутренний источник состоит, в основном, из нейтронов, появляющихся при распаде ядер-предшественников запаздывающих нейтронов, нейтронов спонтанного деления урана и нейтронов от внешнего источника, вызвавших акты деления в активной зоне. Сильным считают источник, для которого выполняется условие $S_0 l \gg 1$ [3], где S_0 — внутренний источник нейтронов, l — время жизни мгновенных нейтронов. Такой источник обеспечивает почти 100%-ную вероятность инициирования устойчивой цепи делений даже в состоянии ниже мгновенной критичности. При слабом внутреннем источнике $S_0 l \ll 1$ момент начала теплового самогашения будет определяться вероятностными процессами и может начаться поздно, когда аварийная реактивность уже введена [3, 4].

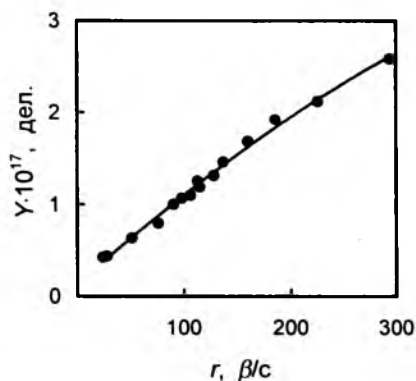
Большинство импульсных реакторов работает в режиме «ожидание», в котором вначале вводят избыточную реактивность, ожидают затухания колебаний реактивности после резкого торможения и остановки стержня, затем принудительно иницируют импульс нейтронами внешнего источника. В этом режиме необходимая избыточная реактивность легко достигается при небольшой скорости ввода $\sim 10 \beta/\text{с}$, так как во время ввода действует слабый внутренний источник и реактор

может долго не реагировать на увеличение реактивности. Однако режим имеет недостатки, основной из которых связан с тем, что механизм защиты (тепловое самогашение) подключается уже после ввода реактивности. Кроме этого, для генерирования импульсов с требуемой точностью в режиме «ожидание» необходимо вводить и реализовывать избыточную реактивность с погрешностью не более $0,001 \beta$, что трудно. Для предотвращения аварий вводимая реактивность в любой ситуации не должна превышать больше, чем на $0,02$ — $0,05 \beta$, максимально разрешенную избыточную реактивность, но в режиме имеется возможность случайного (или целенаправленного в результате противоправных действий) ввода существенно большей реактивности, которая будет полностью реализована в одном импульсе и приведет к аварийной ситуации с тяжелыми последствиями.

Для устранения этих недостатков в РФЯЦ—ВНИИТФ создавался другой режим — «мощность», в котором небольшие излишки во вводимой реактивности были бы незаметными, а внутренняя безопасность была бы обеспечена физическими процессами, исключающими реализацию всей аварийной реактивности в одном импульсе. В режиме «мощность» вначале создают в реакторе сильный внутренний источник нейтронов, инициирующий устойчивую цепь делений, затем вводят ту же реактивность до начала теплового гашения, т.е. защитный механизм подключен уже на этапе ввода реактивности. Режим «мощность» отрабатывался на реакторах БАРС много лет, так как не удавалось достигнуть необходимой скорости ввода реактивности $\sim 300 \beta/\text{с}$. Получить ее удалось на двухзонном реакторе БАРС-5 [2], и при такой скорости реактор генерирует максимально разрешенный импульс энерговыделением $2,5 \cdot 10^{17}$ делений (в результате $3,6 \cdot 10^{10}$ делений выделяется 1 Дж энергии).

Главным требованием режима «мощность» является наличие в активной зоне реактора сильного внутреннего источника нейтронов. При вводе реактивности в условиях сильного источника нейтронный поток будет следовать за ростом реактивности, затем подключится тепловое гашение и сформируется импульс делений. Продолжающийся ввод реактивности не сможет заметно повлиять на энерговыделение, так как скорость гашения значительно выше скорости ввода. В этом заключена первая важная особенность режима — при генерации импульса можно вводить требуемую реактивность с небольшим запасом, который нейтрализует возможные погрешности в калибровках стержней, определении состояния мгновенной критичности, нахождении стартовой реактивности и др. Сразу же после колоколообразной части импульса реактор подкритичен относительно мгновенной критичности, и поэтому продолжающийся ввод реактивности $0,02$ — $0,05 \beta$ не опасен, хотя ввод существенно большей реактивности может привести к получению второго импульса. Второй импульс и все последующие, если реактивности окажется достаточно, будет гораздо меньше первого, так как чрезвычайно высокий внутренний источник нейтронов от предыдущего импульса не позволит реализовать большую реактивность. В этом заключена вторая особенность режима «мощность» — в аварийных ситуациях, когда вводится очень большая реактивность, она реализуется в нескольких маленьких импульсах, а не в одном аварийном, поэтому последствия аварии будут не столь серьезны.

Эксперименты показали, что характеристики импульсов в режиме «мощность» действительно определяются прежде всего скоростью ввода реактивности. Влияние на энерговыделение времени жизни мгновенных нейтронов, стартового уровня мощности, погрешностей в калибровках стержней и др. слабее. Поэтому требуется точно задавать скорость ввода реактивности, а это для разработанных механизмов реактора гораздо легче, чем точно вводить реактивность. Одновременно максимальная скорость ввода реактивности ограничена конструктивно, что способствует безопасности реактора. На рис. 1 представлена экспериментальная зависимость энерговыделения в импульсе для одной активной зоны БАРС-5 от скорости ввода реактивности. Зависимость почти линейна, что удобно при управлении реактором и прогнозировании параметров импульса. Некоторые экспериментальные результаты при отработке режима «мощность» на БАРС-5 представлены в таблице. Эксперименты проводили на одной активной зоне, вторая при этом находилась на расстоянии 1,5 м в остановленном состоянии.



Р и с. 1. Зависимость энерговыделения в импульсе от скорости ввода реактивности

Экспериментальные характеристики импульсов при скорости ввода реактивности 134 β/с

Номер пуска	$N_{\text{вск. дел./с}}$	Реактивность, β		T , мкс	$t_{1/2}$, мкс	$Y \cdot 10^{17}$, дел.
		вводимая	реализованная			
192	$2,5 \cdot 10^{11}$	0,096	0,095	19,7	61	1,51
193	$2 \cdot 10^{11}$	0,112	0,092	20,6	61,7	1,44
194	$2,1 \cdot 10^{11}$	0,126	0,092	20,7	62,3	1,52
195	$2,6 \cdot 10^{11}$	0,146	0,087	21,9	64	1,43
196	$2,2 \cdot 10^{11}$	0,145	0,092	21	65	1,45
202	$2 \cdot 10^{13}$	0,123	0,072	26,3	—	1,15
203	$2 \cdot 10^{14}$	0,123	0,066	28,7	82	1,01

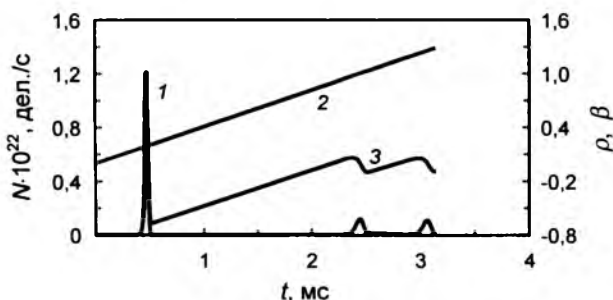
В серии импульсов 192—196 последовательно небольшими добавками увеличивали вводимую избыточную реактивность с 0,096 β до 0,145 β при постоянной скорости ввода. По экспериментальным результатам видно, что в импульсах реализовывалась одинаковая реактивность, так как все параметры — период разгона, полуширина импульса и энерговыделение почти не изменялись от импульса к импульсу. Зарегистрировано, что по мере увеличения вводимой реактивности все большая нереализованная реактивность перекачивалась в продолжительное и медленно спадающее плато, следующее за колоколообразной частью импульса, и не меняла его параметры. В режиме «ожидание» импульсы с реализованной реактивностью 0,096 β и 0,145 β имеют энерговыделения $1,5 \cdot 10^{17}$ и $2,5 \cdot 10^{17}$ делений соответственно, т.е. в одном режиме работы энерговыделение в импульсах отличается примерно в 1,5 раза, в другом режиме работы реактора оно одинаково. Это важный

результат — реактор в режиме «мощность» не реагирует на небольшие излишки во вводимой избыточной реактивности и по сути сам реализует ту избыточную реактивность, которая соответствует скорости ввода.

Импульсы 194, 202 и 203 демонстрируют влияние стартовой мощности — ее увеличение в тысячу раз уменьшило энерговыделение с $1,52 \cdot 10^{17}$ до $1,0 \cdot 10^{17}$ делений.

Основное достоинство режима «мощность» продемонстрируем на примере аварийной ситуации, когда с потолка реакторного зала падает обломок строительного материала, протекает большое количество воды или даже обрушивается потолок, например, при землетрясении или в результате ввода реактивности противоправными действиями. Скорость падающего с потолка тела при его подлете к активной зоне составляет ~ 11 м/с, что соответствует скорости ввода реактивности $\sim 110 \beta/\text{с}$. Увеличение реактивности реактора при окружении активной зоны бетоном оценивается в 3β . Наиболее опасно, если оно будет синхронизовано с моментом перехода реактором состояния мгновенной критичности при генерации максимального импульса при скорости ввода $300 \beta/\text{с}$. Тогда результирующая скорость ввода избыточной реактивности в течение нескольких миллисекунд составит $410 \beta/\text{с}$.

Расчетные характеристики импульсов при работе в режиме «мощность» для этой ситуации представлены на рис. 2. Программа расчета верифицирована на па-



Р и с. 2. Форма импульсов (1), введенная (2) и реализованная избыточная реактивность (3) (отсчет времени от момента перехода через состояние мгновенной критичности)

раметрах импульсов только в рабочем диапазоне энерговыделения и реактивности, и поэтому результаты расчетов аварийной ситуации при большой избыточной реактивности следует рассматривать как оценки. Вычисления прекращены после третьего импульса, так как общая картина процесса уже понятна. Первый импульс будет иметь энерговыделение $\sim 4,1 \cdot 10^{17}$ делений и полуширину ~ 30 мкс, затем генерируются небольшие импульсы энерговыделением $\sim 10^{17}$ делений и полушириной ~ 80 — 100 мкс. К моменту ввода неучтенной избыточной реактивности $1,3 \beta$ полное энерговыделение составит $6,4 \cdot 10^{17}$ делений.

Последствия аварийной ситуации серьезны — можно разрушить и частично расплавить активную зону, но энерговыделение будет реализовано в нескольких импульсах, а не в одном, взрывного энерговыделения не будет, ударная волна не образуется. Для возникновения столь серьезной аварии необходимы не только большая неучтенная реактивность, но и важен момент ее ввода, который должен быть синхронизован с переходом реактором состояния мгновенной критичности. В более вероятных ситуациях, когда увеличение реактивности составит несколько десятых β и вряд ли будет достигнута необходимая синхронизация с моментом перехода через мгновенную критичность, аварийной ситуации либо вообще не произойдет, либо ее последствия будут незначительны.

Отметим, что при работе реактора в режиме «ожидание» можно прогнозировать суммарное энерговыделение более 10^{20} делений при вводе и реализации в одном импульсе $1,3 \beta$, что приведет к испарению активной зоны, разрушению реакторного здания и выходу наружу загрязнения.

В режиме «мощность» существуют аварийные ситуации, присущие только этому режиму и связанные либо со случайным увеличением скорости ввода реактивности, но не более $300 \beta/\text{с}$, либо с уменьшением внутреннего источника нейтронов и отсутствием 100%-ной вероятности инициирования в районе мгновенной критичности. И в том и в другом случае размер аварии будет определяться запасом реактивности, который при безаварийной работе вводился после колоколообразной части, а при возникновении аварии реализуется в колоколообразной части импульса. Если запас реактивности примерно равен $0,02\text{—}0,05 \beta$, что достаточно для практических целей, то аварийной ситуации не произойдет, так как энерговыделение не превысит допустимого энерговыделения $\sim 2,5 \cdot 10^{17}$ делений.

По мере уменьшения внутреннего источника нейтронов режим «мощность» будет все в большей степени приближаться к режиму «ожидание» со всеми присущими ему недостатками и может стать даже более опасным за счет высокой скорости ввода реактивности. Для исключения этого в каждой активной зоне реактора БАРС-5 механически закреплен постоянный нейтронный источник, обеспечивающий сильный внутренний источник нейтронов. Для большей безопасности следует рассмотреть возможность создания неуничтожимого или неизвлекаемого внутреннего источника нейтронов достаточной мощности.

Таким образом, для нейтрализации возможных ошибок в предварительных калибровках и для повышения самозащиты импульсного реактора создан режим работы, для которого характеристики импульсов зависят, в основном, от скорости ввода реактивности. Небольшие излишки во вводимой избыточной реактивности несут существенны, внутренняя безопасность реактора обеспечена физическими процессами, исключающими реализацию введенной аварийной реактивности в одном импульсе. При ее вводе формируется серия последовательно уменьшающихся импульсов делений, что существенно снижает аварийное энерговыделение, и последствия аварии будут локализованы в реакторном здании.

Авторы благодарят специалистов РФЯЦ—ВНИИТФ и персонал реакторов БАРС за участие в создании и исследовании режима «мощность».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горновой Г.А., Горин Н.В., Кошмяков В.П. и др. Опыт эксплуатации быстрых импульсных ядерных реакторов БАРС-1, 2, 3 во ВНИИТФ. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки, 1994, вып. 2.
2. Snopkov A.A., Gorin N.V., Gornovoy G.A. et al. Two-core fast pulse reactor БАРС-5. — In: Intern. Embedded Topical Meeting «Physics, Safety, and Applications of Pulse Reactors», Washington, Nov. 13—17, 1994, p. 300—315.
3. Hansen G. Assembly of fissionable material in the presence of a weak neutron source. — Nucl. Sci. Engng, 1960, v. 8, № 6, p. 700—719.
4. Hurwitz H., MacMillan D., Smith J., Storm M. Kinetics of low source reactor startups. Part I, II. — Ibid., 1963, v. 15, № 2, p. 166—196.