

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Minato K., Ikegami T., Inoue T. Recent research and development activities on partitioning and transmutation of radioactive nuclides in Japan. — In: Eighth Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning & Transmutation. Las Vegas, Nevada, USA, November 9—11, 2004, p. 29—48.
2. Malambu E., Haack W., Sobolev V., Abderrahim H. MA and LLFP transmutation performance assessment in the MYRRHA experimental ADS. — Ibid., p. 471—482.
3. Zrodnikov A., Gulevich A., Chekounov V. e.a. Nuclear waste burner for minor actinides elimination. — Progress in Nuclear Energy, 2005, v. 47, № 1—4, p. 339—346.
4. Gromov B.F., Belomitcev Yu.S., Yefimov E. I. e.a. Use of lead-bismuth coolant in nuclear reactors and accelerator-driven systems. — Nuclear Engng Design, 1997, v. 173, p. 207—217.
5. Gromov B.F., Orlov Y.I., Gulevsky V.A. e.a. Problems of heavy coolant technology for accelerator-driven systems. — In: Intern. Conf. on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Application (ADTTA'99). Prague, Czech Rep., 1999, p. P-E21.
6. Novikova N.N., Pashkin Yu.G., Chekunov V.V. Neutronics of subcritical blankets cooled with lead-bismuth. — Ibid., p. P-F28.
7. Гулевич А.В., Дьяченко П.П., Зродников А.В., Кухарчук О.Ф. Связанные реакторные системы импульсного действия. М.: Энергоатомиздат, 2003.
8. Колесов В.Ф., Гужовский Б.Я. Повышение эффективности электроядерного трансмутационного устройства за счет многосекционной структуры blankets. — Атомная энергия, 1994, т. 76, вып. 1, с. 71—77.
9. MCNP — a General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. LA-UR-03-1987, April 24, 2003.
10. Бережной К.В., Кухарчук О.Ф. Применение кода MCNP для расчета нейтронно-физических характеристик связанных реакторных систем: Препринт ФЭИ-2961, 2002.

Поступила в Редакцию 6.09.06

УДК 629.031.57

РАБОТА РЕАКТОРА ИГРИК В МНОГОИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

Кедров А.В., Андреев В.В., Мингазов О.А., Порубов С.Г., Шугаев С.В. (РФЯЦ — ВНИИТФ)

Импульсный реактор ИГРИК введен в эксплуатацию в 1976 г. и относится к классу растворных реакторов [1, 2]. Активная зона реактора — раствор уранил-сульфата в легкой воде. Раствор подается в корпус активной зоны из баллона-хранилища непосредственно перед реализацией импульса с помощью дозирующего насоса. ИГРИК эксплуатируется в трех основных режимах работы — импульсном, квазиимпульсном, статическом.

Импульсный режим реализуется за счет делений ядер урана мгновенными нейтронами при одновременном выведении из активной зоны четырех импульсных стержней. Суммарный запас реактивности стержней составляет $6 \beta_{эф}$. Для реализации требуемого энерговыделения изменяется начальный уровень топливного раствора в корпусе активной зоны. Реализуемое за импульс энерговыделение составляет 5—60 МДж. Ширина импульса на полувысоте изменяется от 2 до 20 мс.

Квазиимпульсный режим является модификацией импульсного, в котором импульс реализуется за счет запаздывающих нейтронов. Вводимая реактивность варьирует в диапазоне 0,5—1,2 $\beta_{эф}$ выше критического состояния на запаз-

дывающих нейтронах. При переводе системы выше состояния мгновенной критичности в диапазоне 0,07—0,2 $\beta_{эф}$ фактически реализуется импульс делений на мгновенных нейтронах с большой шириной и в его «хвосте», который формируется запаздывающими нейтронами, содержится до 50% общего энерговыделения. Длительность импульса в этом режиме изменяется в диапазоне от 0,02 с до нескольких десятков секунд.

В статическом режиме реактор может работать на мощности до 30 кВт длительное (до нескольких часов) время. Заданная мощность достигается заливкой в корпус активной зоны необходимого количества топливного раствора. Снижение мощности компенсируется периодической доливкой топливного раствора из баллона-хранилища.

Реактор используется в основном для получения одиночных импульсов делений. Каждый последующий импульс генерируется, как правило, спустя несколько часов после предыдущего. Однако для некоторых ядерно-физических экспериментов требуется серия последовательных импульсов, разделенных малым интервалом времени. В настоящей статье рассмотрены вари-

анты последовательного вывода из активной зоны всех четырех стержней по одному в целях получения четырех и более импульсов делений. При такой реализации импульсов возможно получение как обычных импульсов, так и квазиимпульсов. Поэтому для данного режима работы особенно важно учитывать факторы, влияющие на реактивность системы и в конечном итоге на формирование импульсов. К числу таких факторов можно отнести стартовое состояние реактора (начальная подкритичность системы), состояние топливного раствора (начальное давление в корпусе активной зоны, температура раствора, степень насыщения раствора газом перед импульсом), интервал времени между импульсами делений, энерговыделение, реализованное в предыдущих импульсах данной серии. Учет влияния перечисленных факторов, а также диапазона их изменений и ограничений позволил полнее использовать многоимпульсный режим работы реактора ИГРИК.

Особенности многоимпульсного режима. Возможность получения последовательных импульсов. При генерировании нескольких импульсов эффективность стержней, кроме первого, уменьшается от импульса к импульсу вследствие изменения конфигурации и состава активной зоны. Генерирование импульсов энерговыделением ~ 10 МДж сопровождается разогревом раствора (статический температурный коэффициент гашения реактивности составляет $\sim 0,03 \beta_{\text{эф}}/^\circ\text{C}$), его разлетом и образованием пузырьков радиолитического газа. Реактор после импульса даже при возвращении разлетевшегося топлива в исходную геометрию находится в состоянии ниже критического на запаздывающих нейтронах. Инерциальное давление в растворе не столь велико, так что газопаровые пузырьки в заметном количестве присутствуют в растворе и наряду с его температурным расширением определяют динамику разлета активной зоны и самогашение реактора [3].

Таким образом, после первого импульса образуются пузырьки радиолитического газа, разогревается и разлетается топливный раствор. За время ~ 1 с под действием силы тяжести топливо возвращается к исходной геометрии, и реактивность системы возрастает. Кроме того, частично пузырьки радиолитического газа выходят из раствора, максимальная температура раствора при его перемешивании уменьшается, и система

возвращается в состояние, близкое к критическому на запаздывающих нейтронах.

Эффективность стержней, выводимых после первого импульса, достаточна для того, чтобы компенсировать изменение реактивности реактора, обусловленное разогревом топлива, и перевести реактор в состояние выше критического на мгновенных нейтронах без добавления в корпус дополнительного объема раствора. Следовательно, имеется возможность генерирования последующих импульсов делений спустя промежутки времени, достаточный для перемешивания топлива и возвращения его в исходную геометрию. К этому времени в активной зоне имеется достаточно мощный внутренний источник нейтронов, поэтому скорость ввода реактивности при генерировании последующих импульсов делений должна быть достаточно большой. Скорость ввода реактивности одним стержнем составляет $\sim 15 \beta_{\text{эф}}/\text{с}$.

Регистрация параметров импульсов. Импульсы регистрировали в едином масштабе времени системой протоколирования. Она позволяет проводить все необходимые измерения при подготовке к импульсу, а также регистрацию, математическую обработку формы каждого импульса и выдачу протокола работы. В качестве датчиков используются нейтронные камеры КНК-15 и КНТ-54, работающие в токовом режиме. Дополнительно определяли стартовое состояние реактора (реактивность подкритической размножающей системы) методом анализа переходных процессов при выведении нейтронного источника из активной зоны.

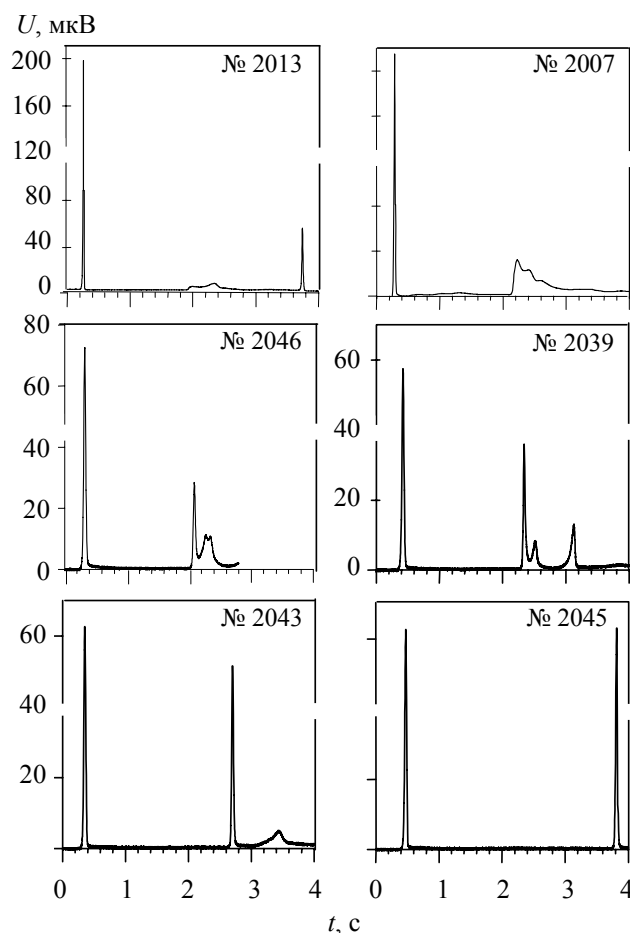
Результаты измерений. При отработке режима генерирования серии последовательных импульсов определяли их параметры при различных стартовых состояниях системы, вводе избыточной реактивности с помощью различных стержней и для различных интервалов времени между выводом стержней из активной зоны.

Для каждого последовательного импульса определяли зависимость сигнала детектора $U=f(t)$ (который пропорционален мощности реактора) от времени, энерговыделение, ширину на полувысоте, период нарастания мощности и реактивность. Реактивность для второго и последующих импульсов вычисляли по периоду нарастания мощности без учета изменения времени жизни нейтронов в разогретой активной

зоне. На данном этапе работы это изменение не учитывали.

Изменение интервала между первым и вторым вводом реактивности. Как показали исследования [2, 4], реализовать второй импульс в интервале от 0 до 0,7 с после первого импульса невозможно. Выведение из активной зоны одного стержня в интервале от 0,7 до 1,7 с приведет к реализации квазиимпульса. Однако параметры данного импульса сильно изменяются в зависимости от интервала времени после первого импульса. Увеличение этого интервала времени приводит к росту энерговыделения второго импульса при одинаковой вводимой реактивности в первом импульсе (сравнение проводили для двух значений введенной в первом импульсе реактивности $\sim 1,5 \beta_{\text{эф}}$ и $\sim 1,3 \beta_{\text{эф}}$). Первый импульс реализовывался вводом одного стержня по команде «0» блока временных команд, второй — извлечением еще одного стержня в интервале времени 1,8—3,7 с. Форма первых двух импульсов приведена на рис. 1, результаты измерений их параметров — в табл. 1.

При введении первоначально большей избыточной реактивности (импульсы № 2013 и 2007) видно, что система после первого импульса переводится в глубокоподкритическое состояние и повторный ввод реактивности приводит к реализации второго импульса с меньшими амплитудой и энерговыделением, хотя введенная реактивность в первом (№ 2039) и втором импульсе (№ 2013 и 2007) была одинакова и составляла $\sim 1,3 \beta_{\text{эф}}$. Уменьшение амплитуды и энерговыделения, увеличение ширины второго



Р и с. 1. Зависимости первого и второго импульса от времени повторного ввода реактивности

импульса объясняется тем, что после первого импульса в системе имеется достаточно «сильный» внутренний источник нейтронов и эффективность стержней полностью не реализуется из-за низкой скорости ввода реактивности. Кроме того, коэффициент гашения реактивности во втором импульсе зависит от давления радиолитического газа над зеркалом топливного раствора, концентрации растворенного в жидкости радиолитического газа и температуры топлива после первого импульса. Параметры второго импульса зависят также от степени завершения всех переходных процессов в активной зоне после первого импульса, приводящих к росту реактивности, т.е. от времени между импульсами (стартовое состояние реактора по реактивности в данном случае оказывается все еще ниже критического на запаздывающих нейтронах).

Изменение реактивности, вводимой в первом импульсе. При отработке режима генерирования последовательных импульсов определяли их параметры в зависимости от ввода

Таблица 1. Зависимость параметров первых двух импульсов от интервала между вводом реактивности

Номер пуска	t , с		$\theta_{1/2}$, мс		ρ , $\beta_{\text{эф}}$		Q , МДж	
	Импульс							
	1-й	2-й	1-й	2-й	1-й	2-й	1-й	2-й
2013	0	1,8	12,2	438	1,51	1,29	9	6,6
2007	0	2	10,2	330	1,57	1,31	9,2	7
2046	0	2	35	39	1,34	1,4	9,37	3,69
2039	0	2,2	36,5	30	1,3	1,4	7,6	5
2043	0	2,6	34	31	1,36	1,47	6,72	5,25
2045	0	3,7	34,5	26	1,34	1,44	8,38	5,46

Примечание. t — время ввода реактивности, $\theta_{1/2}$ — ширина импульса на полувысоте, ρ — реактивность, Q — энерговыделение.

избыточной реактивности от 1,07 до 1,51 $\beta_{эф}$ в первом импульсе.

Зависимость мощности реактора от времени при введении реактивности первым стержнем в несколько сотых $\beta_{эф}$ выше критического состояния на мгновенных нейтронах можно проследить на примере реализации серии импульсов № 2023, 2029, 2037. Максимальным по амплитуде и энерговыделению является третий импульс во всех случаях, где в первом импульсе вводится реактивность в несколько сотых долей $\beta_{эф}$ выше критического состояния на мгновенных нейтронах.

При увеличении вводимой реактивности в первом импульсе амплитуда второго импульса растет, третьего уменьшается, поэтому можно получить примерно одинаковые по амплитуде три импульса. Это видно на примере реализации серии импульсов № 2036, 2039 (табл. 2, рис. 2). Увеличение энерговыделения в первом и втором импульсах ведет к постепенному повышению температуры топливного раствора и насыщению его радиолитическим газом, что в свою очередь приводит к росту эффективной обратной связи и уменьшению по амплитуде третьего импульса.

Последовательные импульсы, реализованные выведением стержня в момент всплеска мощности. После каждого последовательного импульса (начиная с второго) происходит всплеск мощности, свидетельствующий о возвращении системы в критическое состояние. В пусках № 2036 и 2043 (см. рис. 2) были получены четыре почти одинаковых импульса, обусловленных поочередным выведением стержней, и всплески мощности после них. При этом наблюдается уменьшение интервала между импульсом и всплеском мощности с увеличением порядкового номера импульса. Это свидетельст-

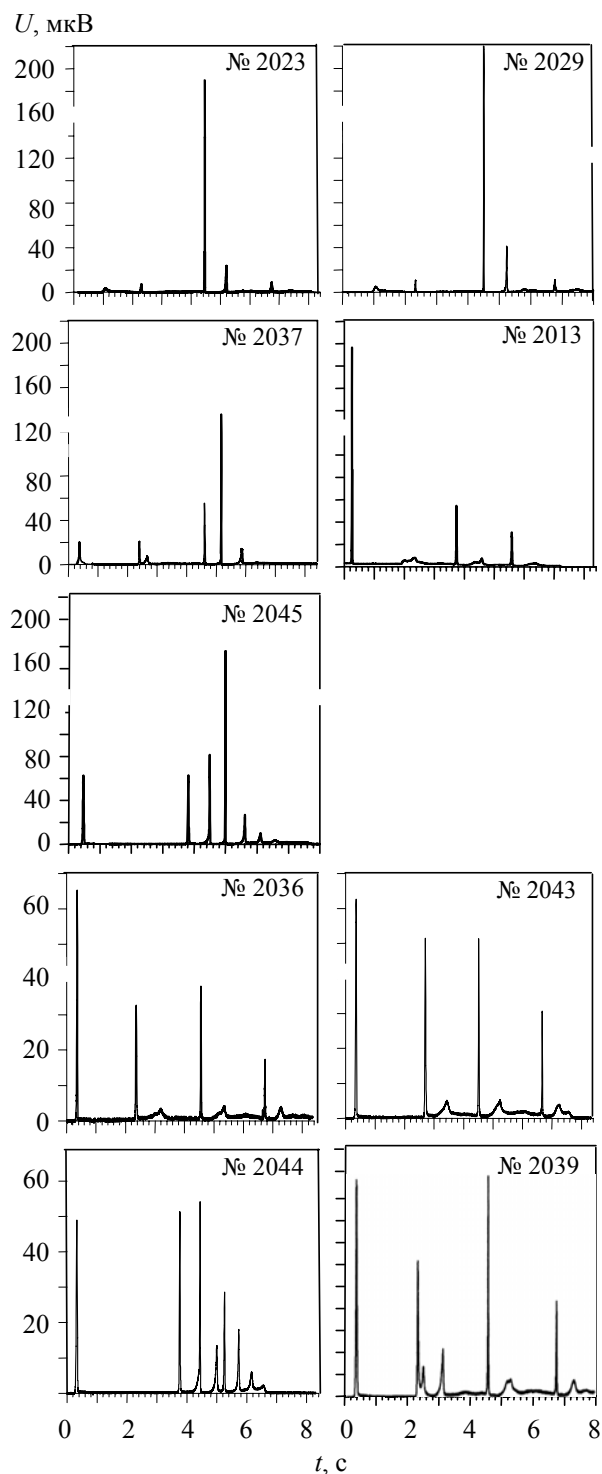
вует о том, что система с разогретой активной зоной после реализации импульса быстрее возвращается в критическое состояние. Разогрев топливного раствора приводит к возрастанию объема активной зоны и увеличению плоского слоя над экспериментальным каналом, следовательно, и росту реактивности в данной геометрии. Толщина этого слоя перед первым вводом реактивности составляет ~5 см. После первого импульса всплеска мощности не наблюдается. Попытка его обнаружить привела к увеличению интервала между первым и вторым вводом реактивности в пусках № 2044 и 2045. Результат был также отрицательный, что свидетельствует о том, что система при трех введенных стержнях (после генерации первого импульса) не может приблизиться к критическому состоянию на мгновенных нейтронах.

В дальнейшем была предпринята попытка смоделировать серию последовательных импульсов делений без следующих за ними всплесков и хвостов, реализованных только введением стержней. Для этого в пуске № 2045 вводили реактивность в момент всплеска мощности после очередного импульса. В результате была получена серия из трех примерно одинаковых импульсов и большого четвертого. В дальнейшем была получена серия импульсов, амплитуда которых от импульса к импульсу уменьшалась, также сокращались интервалы времени между ними. Затем реактор перешел в статический режим работы и сбросом стержней был переведен в подкритическое состояние.

Если сбросить все стержни после последнего импульса, то дальнейшие всплески мощности отсутствуют и будут получены четыре последовательных импульса, каждый из которых обусловлен введением реактивности. Интервал времени между первым и вторым вводом реактивности можно варьировать от 2 до 4 с (возможно,

Т а б л и ц а 2. Зависимость параметров последовательных импульсов от введенной реактивности в первом импульсе

Номер пуска	$\rho, \beta_{эф}$				$\theta_{1/2}, \text{мс}$				$Q, \text{МДж}$			
	Импульс											
	1-й	2-й	3-й	4-й	1-й	2-й	3-й	4-й	1-й	2-й	3-й	4-й
2023	1,07	1,32	1,52	1,16	145	26	21	22	6	1,3	8	2,5
2029	1,1	1,28	1,7	1,1	139	25	8,5	22	5,9	1,3	8,8	5
2037	1,21	1,49	1,47	1,07	70	26	19,5	46,5	4,7	2,6	4,5	6
2039	1,3	1,4	1,44	1,35	36,5	30	18,5	22,5	7,6	5	3,9	2,7
2036	1,4	1,44	1,35	1,25	27,5	35,5	19	25	6,8	4,7	3,4	2,2
2013	1,51	1,29	1,44	1,32	12,2	438	19,6	23,6	9	6,6	4,4	2,9



Р и с. 2. Реализация нескольких вариантов генерирования серии последовательных импульсов

и дольше, что требует дополнительных исследований). Между последующими вводами реактивности интервалы фиксированы. Данный режим может быть использован для задач, которым требуются аналогичное время между импульсами или интервалы времени между импульсами не регламентируются.

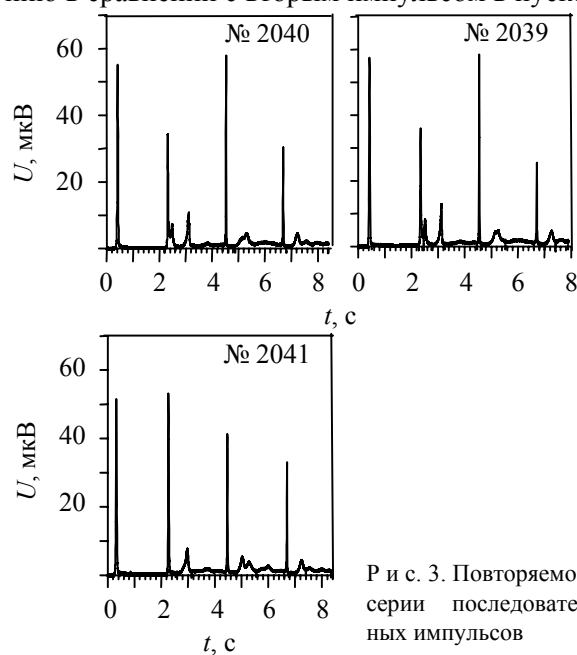
Варьирование параметров последовательных импульсов. На следующем этапе изучали работу реактора в многоимпульсном режиме при постоянной вводимой реактивности в первом импульсе и изменении очередности выведения стержней из активной зоны.

Первоначально была предпринята попытка доказать возможность повторяемости серии последовательных импульсов. Для этой цели были проведены пуски № 2039, 2040. Зависимость сигнала детектора от времени при одинаковом стартовом состоянии $\rho_{ст} = -0,26 \beta_{эф}$ и одинаковом способе реализации импульсов приведена на рис. 3. Были получены идентичные импульсы как по энерговыделению, так и амплитуде. Единственным отличием является форма всплеска мощности после третьего ввода реактивности (всплески на пятой секунде).

В пуске № 2041 второй импульс реализовывался при том же стартовом состоянии реактора, что и в пусках № 2039, 2040, но при другом способе (реактивность вводили с теми же интервалами времени, но очередность выведения стержней из активной зоны в пуске № 2041 заменили). Была получена другая зависимость мощности реактора от времени, что свидетельствует о различной эффективности стержней в зависимости от их взаимного расположения (табл. 3). В этом

случае эффективность

второго стержня увеличилась, и второй импульс был на 40% больше по энерговыделению в сравнении с вторым импульсом в пуске №



Р и с. 3. Повторяемость серии последовательных импульсов

Таблица 3. Зависимость параметров последовательных импульсов от способа их реализации

Номер пуска	$\theta_{1/2}$, мс				ρ , $\beta_{эф}$				Q , МДж			
	Импульс											
	1-й	2-й	3-й	4-й	1-й	2-й	3-й	4-й	1-й	2-й	3-й	4-й
2039	36,5	30	18,5	22,5	1,3	1,4	1,44	1,35	7,6	5	3,9	2,7
2040	37	30,5	17,5	20	1,3	1,43	1,42	1,35	8,1	4,5	5	2,4
2041	38,5	30,5	21	18,5	1,3	1,5	1,4	1,28	8	7	4,5	3,4

2040.

Следует отметить, что после пика второго импульса через некоторое время наблюдается всплеск мощности: пуск № 2046 (см. рис. 1), пуски № 2039, 2040 (см. рис. 3), для квазиимпульсов он наблюдается на заднем фронте второго импульса № 2007 (см. рис. 1), № 2037 (см. рис. 2). При увеличении интервала между первым и вторым импульсом № 2043 (см. рис. 1), а также при другом способе реализации (другой очередности выведения стержней из активной зоны) № 2041 (см. рис. 3) такой всплеск мощности не наблюдается. Всплеск на заднем фронте второго импульса не может быть объяснен малой скоростью ввода реактивности, так как импульс развивается через 150 мс после второго ввода реактивности, когда стержень уже полностью выведен из активной зоны. Всплеск мощности может быть объяснен или различной эффективностью второго и третьего стержня, или различным состоянием системы после выведения двух стержней в различных вариантах (стержни, расположенные рядом или осесимметрично).

Заключение. Экспериментальные данные дают представление о процессах, протекающих в активной зоне реактора при реализации многоимпульсного режима. На основании этих данных удалось определить возможности работы реактора ИГРИК в этом режиме, диапазон изменения параметров импульсов, а также выявить ограничения, накладываемые физическими процессами и особенностью конструкции установки.

Последовательный вывод из активной зоны четырех стержней приводит к генерации серии импульсов и квазиимпульсов. Параметры импульсов, начиная с второго, зависят только от параметров первого импульса и интервала времени между последующими вводами реактивности, которые можно регулировать перед началом пуска.

Определена зависимость параметров второго импульса от интервала времени между первым и повторным вводом реактивности. После реализации первого импульса с требуемыми параметрами система возвращается в состояние, близкое к критическому, с выходом на некоторый уровень мощности (хвост после первого импульса). Размер хвоста определяется временем выведения стержней из активной зоны. Так, через 3,7 с после первого импульса делений энерговыделение в хвосте составляет ~36% энерговыделения в первом импульсе. Переход системы через критическое состояние на мгновенных нейтронах за 3,7 с не наблюдался.

Выведение из активной зоны после реализации первого импульса делений еще одного стержня в интервале времени до 1,8 с приведет к реализации квазиимпульса. Однако параметры данного импульса будут сильно меняться в зависимости от введенной реактивности в первом импульсе и интервала времени до реализации второго импульса делений.

При отработке многоимпульсного режима изучена зависимость параметров серии последовательных импульсов делений от ввода различной избыточной реактивности в первом импульсе. Выяснено, что они изменяются в зависимости от введенной реактивности, что позволяет реализовывать серию последовательных импульсов с требуемыми параметрами.

На реакторе ИГРИК получена серия четырех последовательных импульсов делений примерно с одинаковыми параметрами. В интервале времени 1—5 с после первого ввода реактивности возможно реализовать еще три импульса, выводя из активной зоны последовательно три стержня в определенные промежутки времени.

Получен способ вывода реактора ИГРИК в стартовое состояние, который основан на измерениях системы протоколирования, позволяющей определять подкритичность с высокой точ-

ностью (до сотых долей $\beta_{\text{эф}}$). Параметры последовательных импульсов воспроизводимы при одинаковой программе управления движением стержней. Таким образом, выполнена задача получения повторяемости серии последовательных импульсов, что обеспечивает стабильную работу реактора ИГРИК в многоимпульсном режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кедров А.В., Ляпин П.С., Солонцов Л.Л. и др. Растворный импульсный реактор ИГРИК. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1989, вып. 4, с. 3—8.

2. Леваков Б.Г., Лукин А.В., Магда Э.П. и др. Импульсные ядерные реакторы РФЯЦ — ВНИИТФ. Снежинск, РФЯЦ — ВНИИТФ, 2002.
3. Колесов В.Ф., Сизов А.Н. Опыт ВНИИЭФ в расчетах переходных процессов растворных импульсных реакторов. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1996, вып. 2, с. 33—40.
4. Кедров А.В., Андреев В.В., Биянов М.Ю. и др. Особенности работы импульсного реактора ИГРИК в квазиимпульсном и двухимпульсном режимах. — Там же, 2001, вып. 1/2, с. 3—8.

Поступила в Редакцию 5.04.06

УДК 621.313.53

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ НАСОСОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

*Витковский И.В., Кириллов И.Р., Чайка П.Ю. (НИИЭФА им. Д.В. Ефремова),
Крючков Е.А., Поплавский В.М. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского),
Носов Ю.В., Ошканов Н.Н. (Белоярская АЭС)*

Электромагнитные насосы с момента своего появления рассматривались как перспективные устройства, предназначенные для перекачивания жидкометаллического теплоносителя в контурах АЭС с быстрым реактором и сопутствующих им экспериментальных и технологических установках. Отсутствие в таких насосах уплотнений, движущихся частей, простота управления являются очевидными преимуществами с точки зрения надежности и безопасности по сравнению с механическими. Однако отсутствие экспериментальных данных о ресурсной наработке долгое время не позволяло получить численные показатели надежности, сравнить экспериментальные данные с расчетными оценками и тем самым подтвердить преимущества.

В настоящее время в НИИЭФА им. Д.В. Ефремова накоплен опыт эксплуатации индукционных электромагнитных насосов в различных системах быстрых реакторов, технологических и экспериментальных установок, дающий возможность оценить показатели надежности по результатам эксплуатации и сравнить их с расчетными оценками.

Конструктивно любой электромагнитный насос состоит из индуктора и канала. Насосы имеют цилиндрические, винтовые и плоские каналы. Индукторы двух последних типов насосов в общем случае являются аналогами статоров

обычного и линейного асинхронных электродвигателей соответственно. Индуктор цилиндрического насоса представляет собой 3-фазную систему дисковых катушек, установленных в пакетах магнитопровода [1].

Целями настоящей статьи являются оценка и сравнение расчетных и эксплуатационных показателей надежности отдельных составных частей насоса — канала и индуктора для последующей оценки надежности всего изделия. Такой подход оправдывается еще и тем, что на сегодняшний день созданы насосы в ремонтно-пригодном исполнении, позволяющие при необходимости заменять индуктор без разгерметизации канала.

Расчетные оценки показателей надежности электромагнитных насосов. Выход из строя канала или индуктора ведет к отказу насоса в целом, поэтому с точки зрения надежности насос можно рассматривать как устройство, состоящее из двух последовательно соединенных элементов — канала и индуктора. Тогда вероятность безотказной работы насоса можно рассчитать по выражению

$$P_n = P_k P_{\text{и}}, \quad (1)$$

где P_k , $P_{\text{и}}$ — вероятность безотказной работы канала и индуктора соответственно.