Таким образом, анализ нейтронно-физических характеристик не выявил принципиальных ограничений возможности 100%-ной загрузки активной зоны ВВЭР-1000 регенерированным уран-плутониевым топливом при содержании плутония в топливе 2—5% по массе. Однако в связи с значительным уменьшением эффективности систем регулирования реактивности (как механической, так и жидкостной) при увеличении удельного содержания плутония в топливе для дальнейшего обоснования возможности 100%-ной загрузки ВВЭР-1000 регенерированным уран-плутониевым топливом с содержанием плутония 2% и более необходимо исследовать динамические характеристики активной зоны, включая анализ проектных реактивностных аварий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Федоров Ю.С., Бибичев Б.А., Зильберман Б.Я., Кудрявцев Е.Г.** Использование регенерированного урана и плутония в тепловых реакторах. — Атомная энергия, 2005, т. 99, вып. 2, с. 136—141.
2. **Павловичев А.М., Павлов В.И., Семченков Ю.М. и др.** Нейтронно-физические характеристики активной зоны ВВЭР-1000 со 100%-ной загрузкой топливом из регенерированного урана и плутония. — Там же, 2006, т. 101, вып. 6, с. 407—413.
3. **Горский В.В.** Состояние и перспективы применения МОХ-топлива в легководных реакторах. — Атомная техника за рубежом, 2000, № 6, с. 8—15.
4. **Alyeshin S.S., Bolshagin S.N., Bychkova N.A. e.a.** Characteristics of VVER-1000 with 1/3 core loaded by MOX fuel plutonium from surplus Russian nuclear weapons. — In: Proc. PHYSOR 2002. ANS Intern. Topical Meeting. Seoul, Korea, Oct. 7—10, 2002, p. 261.
5. **Ponomarev-Stepnoi N.N., Pavlovichev A.M., Styrin Yu.A.** Russian Weapon Plutonium Disposition in VVER-1000 reactors. — In: Proc. of Intern. Conf. Global'2005. Tsukuba, Japan, Oct. 9—13, 2005, paper 570, p. 6.
6. **Novikov A.N.** Development of VVER physical calculation codes. — In: Proc. of the Tenth Symp. of AER. Moscow, Russia, Oct. 18—22, 2000, p. 433—448.
7. **Правила** ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. ПНАЭГ-1-0024-90 (ПБЯ РУ АС-89). М.: Энергоатомиздат, 1990.
8. **Design** of the Reactor Core for Nuclear Power Plants. Safety Guide № NS-G-1.12. Vienna: IAEA, 2004.

Поступила в Редакцию 6.06.07

УДК 621.039.56

МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ МОЩНОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ИБР-2 С УЧЕТОМ МЕДЛЕННЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Ли Ен Чхан, Пепелышев Ю.Н. (ОИЯИ)

Изучение мощностной обратной связи в импульсном реакторе ИБР-2 в основном было связано с исследованием быстрых эффектов**,** действующих на малом интервале времени (минуты и менее). Эти эффекты отражают тепловые, гидродинамические и механические процессы, происходящие внутри активной зоны. Быструю обратную связь можно представить в виде суммы трех инерционных звеньев с нелинейными элементами (постоянные времени короче 10 с) [1] или пяти, два из которых имеют медленные постоянные времени 5—15 мин [2, 3].

Кроме внутриреакторных быстрых процессов, существенное влияние на реактивность и соответственно на эксплуатационные характеристики оказывают и медленные процессы, обусловленные изменением состояния конструкционных элементов из ближайшего окружения параметры. В качестве иллюстрации методики построения модели использовали данные, полу- активной зоны, например, стационарных отражателей, тепловой и радиационной защиты, а также параметров, задаваемых извне активной зоны, таких, как температура натрия на входе в активную зону, его расход и положение органов регулирования. Кроме того, в качестве медленного процесса для ИБР-2 можно рассматривать и выгорание топлива. Мощностной эффект реактивности, постоянные времени которого больше 1 ч и которые действуют в течение одного или нескольких реакторных циклов, принято считать медленной мощностной обратной связью. В настоящей работе в каждом реакторном цикле выделен полный мощностной эффект реактивности как сумма быстрого и медленного эффектов обратной связи. На основе выделенного эффекта реактивности построена универсальная модель динамики ИБР-2 и определены ее ченные в нескольких последних циклах работы реактора перед его остановом в конце 2006 г.

Краткое описание ИБР-2 и особенности его динамики. Импульсный исследовательский реактор периодического действия на быстрых нейтронах ИБР-2 работает на частоте импульсов 5 Гц при средней мощности 1,5—2 МВт [1]. В отличие от стационарных реакторов, где поддерживается постоянный поток нейтронов, ИБР-2 генерирует периодические нейтронные импульсы, длительность которых на половине высоты в 1000 раз меньше интервала между импульсами ($\theta_{1/2}$ = 215 мкс). Активная зона реактора объемом 22 л имеет форму неправильной шестигранной призмы, расположенной вертикально, и состоит из 74 ТВС, вставленных в опорную решетку с шагом 27 мм и размещенных в стальном корпусе. Каждая ТВС состоит из семи твэлов, каждый из которых содержит вертикальный набор таблеток из диоксида плутония. Активная зона охлаждается жидким натрием с объемным расходом от 80 до 110 м^3/ч. Мимо одной из граней активной зоны проходят две вращающиеся на одной оси, но с разной скоростью лопасти — основной и дополнительный подвижные отражатели модулятора реактивности. К пяти остальным граням примыкают стационарные отражатели, перемещаемые блоки которых являются рабочими органами системы управления и защиты реактора. Для поддержания мощности реактора на заданном уровне используется специальный стержень автоматического регулятора. Активная зона со стационарными отражателями окружена тепловой и радиационной защитой с горизонтальными каналами для вывода нейтронных пучков.

ИБР-2 эксплуатируется в циклическом режиме: обычно по две недели работа на мощности и перерыв (нулевая мощность), затем указанный цикл повторяется до ежегодных планово-предупредительных работ, когда реактор останавливается на три месяца. Далее ежегодный цикл повторяется.

Отметим, что подход к описанию переходных процессов мощности зависит от задачи. Можно выделить три характерных временных диапазона, в которых целесообразно использовать ту или иную модель динамики:

описание процесса изменения мощности во вспышке или за период следования импульса (0,2 с). Используется общепринятое уравнение кинетики. Ход изменения реактивности связан с движением модулятора реактивности. Мощностная обратная связь во время действия импульса мощности мала, и ею можно пренебречь;

описание процесса изменения мощности во время действия быстрой мощностной обратной связи (1—2 мин). Используется общепринятое уравнение кинетики, в котором вместо эффективной доли запаздывающих нейтронов вводится импульсная [4]. Изменением медленной мощностной обратной связи можно пренебречь;

описание процесса изменения мощности за полный цикл работы реактора (1—2 недели). Детальным ходом изменения быстрой мощностной обратной связи можно пренебречь.

Несмотря на существенное изменение реактивности и мощности за период следования импульсов (реактивность меняется от равновесной мгновенной надкритичности до глубокой подкритичности, мощность — в ~10^4 раз), кинетика ИБР-2 может быть описана в рамках общепринятых уравнений, если использовать понятия средней мощности (или энергии), выделяющейся за период, а вместо эффективной доли запаздывающих нейтронов — импульсную [4]. Основная задача динамики как импульсного реактора периодического действия, так и реактора с непрерывным выделением мощности состоит в точности определения мощностной обратной связи.

Реактивность в отдельном реакторном цикле с учетом полного мощностного эффекта. Медленный ход изменения реактивности в цикле можно определить путем изучения ее баланса. При рассмотрении компонентов реактивности с константами несколько часов или суток быстрые компоненты мощностной обратной связи длительностью несколько минут можно рассматривать как безынерционные звенья. В этом предположении с достаточно высокой точностью можно применить квазистационарное уравнение баланса реактивности. Сумма всех эффектов реактивности равна нулю, если система автоматического регулирования компенсирует эти эффекты. Отсюда вводится уравнение баланса реактивности [5]

$$\rho_{\text{СУЗ}} + \rho_T + \rho_G + \rho_{\text{э}} + \rho_P + \rho_{\text{м}} + \rho_x = 0, \qquad (1)$$

где $\rho_{\text{СУЗ}} = \sum_{i=1}^{4}\left[k_i(z_i) - k_i(z_{0i})\right]$ — эффект перемещения органов регулирования; $k_i(z)$ — эффективность i-го блока системы управления и защиты; $\rho_T = k_T\,(T_{\text{вх}} - T_{\text{вх0}})$ — температурный эффект

реактивности натрия на входе в активную зону (изотермический эффект реактивности); $T_{вх}$ — температура натрия на входе в активную зону; k_T — изотермический коэффициент реактивности; ρ_G — эффект реактивности от расхода натрия; $\rho_э = k_э (B - B_0)$ — эффект реактивности, связанный с энерговыработкой (выгорание топлива); $k_э$ — коэффициент реактивности, связанный с энерговыработкой; B — энерговыработка; $\rho_P = k_P (P - P_0)$, k_P — эффект и коэффициент передачи быстрой мощностной связи соответственно; P — мощность реактора; $\rho_м$ — эффект медленной мощностной обратной связи; ρ_x — прочие эффекты реактивности (не поддающиеся точной численной оценке). Нижний индекс 0 означает базовые параметры, соответствующие состоянию импульсной критичности данного цикла. Все компоненты, входящие в уравнение (1), есть функции времени, по которым определяется изменение реактивности за цикл. Рассмотрим каждый из этих компонентов в отдельности.

Расход натрия в цикле колеблется относительно среднего значения в небольших пределах (< 4%). Эти колебания в среднем вызывают малые случайные изменения реактивности, поэтому в уравнении (1) с достаточной точностью этим эффектом можно пренебречь.

Коэффициент энерговыработки можно вычислить по формуле [5]

$$k_э = k_B + a \exp(-B/T_1)/T_1 + b \exp(-B/T_2) \times \\ \times \{(1 - B/T_2)[(B - c)^2 - d] + 2B(B - c)\},$$

где $k_B = -4{,}2975 \cdot 10^{-5}$%/(МВт·ч); $T_1 = 11\,823$ МВт·ч; $T_2 = 6274$ МВт·ч; $a = 0{,}7023$%; $b = 3{,}429 \cdot 10^{-13}$%; $c = 1{,}8489 \cdot 10^4$; $d = 1{,}1057 \cdot 10^8$; B — энерговыработка, МВт·ч.

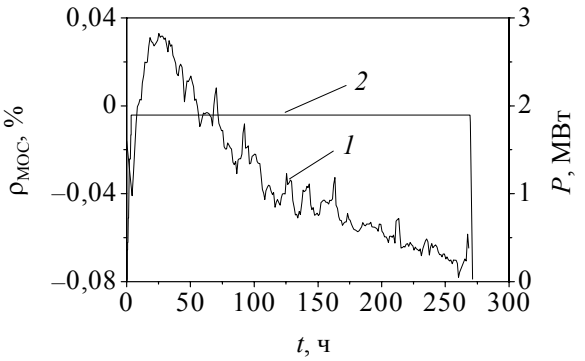
Коэффициент передачи быстрой обратной связи k_p слабо зависит от мощности и сложным образом уменьшается с энерговыработкой [1]. Поэтому в уравнении баланса реактивности каждому циклу соответствует свой коэффициент передачи. Например, в октябре—декабре 2006 г. и в июле 1995 г. коэффициент передачи быстрой обратной связи был равен –0,032 и –0,08%/МВт соответственно. Изотермический коэффициент реактивности слабо растет от $-2{,}165 \cdot 10^{-3}$%/°С в начале эксплуатации реактора (1984 г.) до $-2{,}598 \cdot 10^{-3}$%/°С (2006 г.).

Таким образом, кроме параметров, описывающих медленные процессы, в уравнении (1) известны все параметры, необходимые для оценки наиболее существенных эффектов реактивности. Тогда полную мощностную обратную связь ($\rho_{МОС} = \rho_P + \rho_м$) можно представить в виде

$$\rho_{МОС} = -\sum_{i=1}^{4}\left[k_i(z_i) - k_i(z_{0i})\right] - k_T(T_{вх} - T_{вх0}) - \\ - k_э(B - B_0). \qquad (2)$$

Для параметров, входящих в выражение (2), использовали показания штатных приборов контроля и регулирования реактора: расход натрия в двух петлях первого контура, температура натрия на входе и выходе из активной зоны, положение органов регулирования, тепловая мощность. Энерговыработка определялась интегрированием мощности. Период опроса указанных параметров составлял 1 ч.

Динамическая модель мощностной обратной связи, учитывающая медленные процессы изменения реактивности. Для определения вида модели на рис. 1 приведено типичное изменение полного мощностного эффекта реактивности, вычисленного по соотношению (2), для июльского 1995 г. цикла работы реактора. Видно, что при повышении мощности в начале цикла реактивность резко уменьшается за счет отрицательного эффекта быстрой мощностной связи. Сравнительно быстрое увеличение реактивности с постоянной времени несколько часов, наблюдаемое после повышения мощности, можно описать инерционным звеном с положительным коэффициентом передачи. Примерно через 1 сут начинается умеренное снижение реактивности с постоянной времени около 80 ч. Это уменьшение может быть описано вторым инерционным звеном с отрицательным коэффициентом передачи. Таким образом, медленная мощностная связь может быть представлена



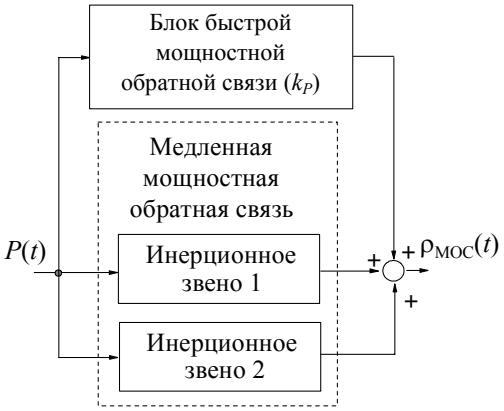
Р и с. 1. Реактивность мощностной обратной связи в июльском цикле 1995 г.: *1* — реактивность; *2* — мощность

двумя инерционными звеньями.

Анализ показывает, что основное влияние на медленное изменение реактивности оказывают стационарные отражатели, тепловая и радиационная защита. С ростом мощности происходит температурное расширение и смещение стационарных отражателей с частичной или неполной воспроизводимостью их деформации при снижении мощности. Изменение реактивности со стороны радиационной защиты, вероятнее всего, связано с колебанием концентрации воды по ее объему при радиационном нагреве, вследствие чего изменяется спектр тепловых нейтронов. Часть тепловых нейтронов испытывает обратное рассеяние в активную зону.

При рассмотрении всей совокупности 197 реакторных циклов как без сброса мощности, так со сбросом (один, два, три, а иногда и более сбросов за цикл) необходимо было принять, что для каждого медленного инерционного звена есть две постоянные времени — нарастания и убывания, т.е. медленный процесс изменения реактивности не описывается линейной моделью. Обычно нелинейность теплового процесса тем сильнее, чем сложнее геометрия тела, чем больше его размеры и чем хуже теплопроводность материала**.** Особенно наглядно это выражается в различии скоростей нагревания и охлаждения. Недостаток линейной модели во многом компенсируется введением квазилинейной модели — инерционного звена с двумя постоянными времени.

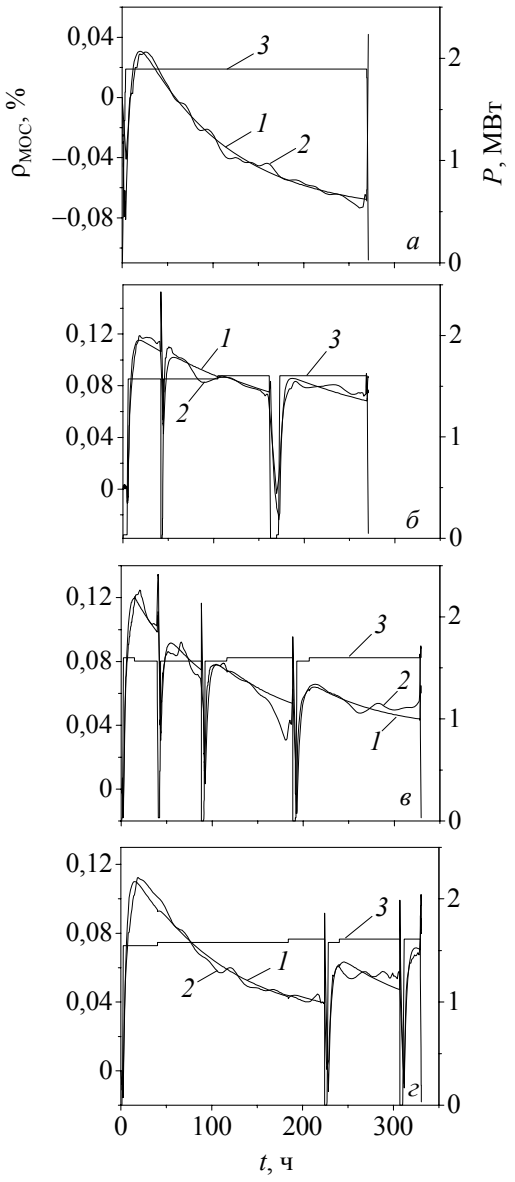
Полную модель мощностной обратной связи можно представить как сумму быстрого и медленного эффектов реактивности (рис. 2). При рассмотрении медленных эффектов длительностью более 1 сут блок динамики быстрой обратной связи можно считать пропорциональным звеном с одним параметром — коэффициентом передачи. Блок медленной мощностной связи может быть представлен двумя инерционными звеньями, каждое из которых характеризуется тремя параметрами: коэффициентом передачи (k_i) и постоянными времени нарастания ($T_н$) и убывания ($T_у$). Критерий переключения между двумя постоянными времени следующий: если выполняется условие $k_i x(t) > y(t)$, где $x(t)$, $y(t)$ — входной и выходной сигнал соответствующего инерционного звена (в данном случае $x(t)$ — мощность реактора, $y(t)$ — компонент реактивности), то реактивность возрастает и используется постоянная времени нарастания, в противном случае, наоборот (при $k_i x(t) = y(t)$ система находится в равновесии). С использованием предложенной модели динамики можно определить изменение реактивности по любой форме изменения мощности и для любого реакторного цикла, включая циклы со сбросом мощности. Отметим, что модель не описывает быстрые процессы длительностью несколько минут.



Р и с. 2. Динамическая модель полной мощностной обратной связи

Параметры динамики медленного действия. Практическое использование модели мощностной обратной связи, включающей описание медленных процессов, заключается в точности определения ее семи параметров. Поскольку данные о состоянии реактора регистрировали с большим интервалом времени (1 ч), было невозможно по ним определить коэффициент передачи быстрой связи. Поэтому использовали данные работ [1, 2]. Параметры медленной связи определяли по многопараметрической аппроксимации реактивности для каждого реакторного цикла в отдельности (см., например, рис. 1). Целевая функция представляла собой сумму квадратов разности реактивности, оцененной по уравнению (2) и полученной из динамической модели для реального хода изменения мощности. Поскольку изменение реактивности в цикле включает также и шумовой компонент, необходимо было исключить возможность выхода целевой функции на локальный минимум. Для устранения влияния шумов реактивности на минимизацию целевой функции использовали фильтр низких частот [6], с помощью которого кривую реактивности предварительно сглаживали. Для того чтобы принципиально важные «пики», образуемые при сбросе или резком изменении мощности, не искажались, фильтровали по

отрезкам. Для примера на рис. 3, *а* показаны отфильтрованная кривая реактивности (исходная кривая приведена на рис. 1) и соответствующая ей кривая, полученная из динамической модели. В таблице приведены параметры k, $T_н$, $T_у$ (коэффициент передачи и постоянные времени нарастания и убывания медленной мощностной обратной связи), вычисленные для некоторых реакторных циклов. Поскольку постоянные времени убывания для циклов без сброса мощности не имеют смысла, в таблице они не приведены. На рис. 3, *а* в начальном процессе повышения мощности модельная кривая описывает глубокий отрицательный пик реактивности, не зарегистрированный экспериментально из-за низкой частоты опроса, но существующий. Из этого факта можно сделать вывод, что предлагаемая модель полной мощностной связи хорошо описывает реальный процесс изменения реактивности.



Р и с. 3. Моделирование изменения реактивности в циклах работы реактора 17.07.1995 (*а*), 16.10.2006 (*б*), 13.11.2006 (*в*), 04.12.2006 (*г*): *1*, *2* — аппроксимированная и измеренная реактивность соответственно; *3* — мощность

Параметры динамики для некоторых циклов работы реактора

Дата	Сброс	k, %/МВт	$T_н$, ч	$T_у$, ч
	Инерционное звено 1			
17.07.95	Нет	0,1085	4,576	—
16.10.06	Да	0,1108	2,511	3,671
13.11.06	Да	0,1155	2,739	3,717
04.12.06	Да	0,1136	2,733	2,615
	Инерционное звено 2			
17.07.95	Нет	–0,0719	99,44	—
16.10.06	Да	–0,0487	106,7	16,24
13.11.06	Да	–0,0608	86,91	13,91
04.12.06	Да	–0,0642	100,5	6,131

Рассмотрим применение модели для циклов с одним или несколькими сбросами мощности. На рис. 3, *б*, *в*, *г* показана реактивность, полученная по соотношению (2) и модели динамики для нескольких последних циклов работы реактора (октябрь—декабрь 2006 г.). Из результатов обработки видно, что даже для достаточно сложного хода изменения мощности (при наличии двух или трех сбросов мощности в цикле) предлагаемая модель динамики дает удовлетворительные результаты. При ступенчатом уменьшении или полном сбросе мощности возникает острый положительный пик реактивности. Это явление обусловлено быстрым отрицательным мощностным коэффициентом реактивности. При сбросе мощности понятие баланса реактивности не существует (реактор не находится в критическом состоянии), поэтому экспериментальным путем получить реальную кривую изменения реактивности невозможно. Этот процесс можно только предвидеть и описать путем моделирования.

Из таблицы видно, что для трех последних циклов параметры динамики близки. Кроме того, нужно отметить, что разница между постоянными времени нарастания и убывания второго звена велика, но малозаметна в первом звене. Это различие, вероятнее всего, может быть связано с нелинейностью температурного процесса в тепловой и радиационной защите реактора. Относительно большие размеры радиационной защиты, ее сложная форма и неудовлетворительная теплопроводность допускают возмож-

ность нелинейных процессов динамики. В циклах без сброса и со сбросом мощности параметры динамики существенно не различаются, за исключением постоянной времени первого инерционного звена. Для выяснения причины этого явления необходимо детальное рассмотрение всех циклов работы реактора.

Заключение. Для изучения медленных процессов изменения реактивности ИБР-2 длительностью более 1 ч построена полная модель динамики, в которой быстрые процессы длительностью менее 1 мин не рассматриваются. Динамическая модель полной мощностной обратной связи включает в себя три компонента: безынерционное звено, медленное инерционное звено с положительным и отрицательным коэффициентом передачи. Каждое медленное инерционное звено имеет две постоянные времени (нарастания и убывания), которые, вероятнее всего, отражают нелинейность температурных процессов динамики в тепловой и радиационной защите реактора. Использование предложенной модели мощностной обратной связи позволяет достаточно точно описать изменение реактивности в любых реакторных циклах со сбросом или без сброса мощности. Часть параметров, описывающих медленные процессы изменения реактивности, различается от цикла к циклу. Для изучения причины этого явления необходимы дальнейшие исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пепелышев Ю.Н., Попов А.К.** Оценка параметров мощностной обратной связи и устойчивости ИБР-2 при различных уровнях средней мощности. — Атомная энергия, 2007, т. 103, вып. 2, с. 89—93.
2. **Бондарченко Е.А., Пепелышев Ю.Н., Попов А.К.** Экспериментальное и модельное исследование особенностей динамики импульсного реактора периодического действия ИБР-2. — Физика элементарных частиц и атомного ядра, 2004, т. 35, вып. 4, с. 928—983.
3. **Попов А.К.** Анализ длительного колебательного переходного процесса мощности импульсного реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р13-97-361, 1997.
4. **Бондаренко И.И., Стависский Ю.Я.** Импульсный режим работы быстрого реактора. — Атомная энергия, 1959, т. 7, вып. 5, с. 417—420.
5. **Ли Ен Чхан, Пепелышев Ю.Н., Рогов А.Д.** Изменение эффекта реактивности реактора ИБР-2, связанного с выгоранием топлива, в период с 1982 по 2006 г.: Препринт ОИЯИ Р13-2007-144, 2007.
6. **Lyons R.** Understanding Digital Signal Processing: Prentice Hall PTR Publishers 184-191, 2001.

Поступила в Редакцию 30.10.07

УДК 621.039.524.2.034.3

ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО РЕАКТОРА С ТВЕРДЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ В РЕЖИМЕ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Дмитриев А.М., Кавун О.Ю., Хренников Н.Н., Пискунова Н.А. (НТЦ по ядерной и радиац. безопасности)

В настоящей статье рассмотрены термодинамические циклы и рабочие параметры реакторной установки для выработки электрической энергии на основе инновационного проекта высокотемпературного ядерного реактора с твердым теплоносителем (ВРТТ). Принципиальная схема с использованием мелких шаровидных теплонесущих частиц на основе графита и пиролитического углерода и ее технологические аспекты — доказательство возможности приемлемой скорости теплоносителя только под действием силы тяготения, экспериментальное большого размера, движущихся через активную зону без специальной ориентации, включая пассивное расхолаживание, изложены в работах [2, 3].

определение коэффициентов теплоотдачи, предварительные исследования износостойкости и оценки физических характеристик реакторной установки изложены в работах [1, 2]. В качестве топлива на первом этапе исследований выбраны микротвэлы и топливные компакты на основе микротвэлов и графита размерами, принятыми в проекте ГТ-МГР (диаметр 12,5 мм, высота 50 мм). Концептуальные вопросы инженерной компоновки реакторной установки, которые позволяют реализовать преимущества твердого теплоносителя в виде теплонесущих частиц не-

Следует отметить, что применение твердого теплоносителя в реакторах с крупноэлементным графитовым теплоносителем изучалось в 1974—1988 гг. Концептуальные идеи, изложенные, в частности, в работах [4—7], предлагали конст-