УДК 621. 039. 519

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБОСНОВАНИЯ РЕЖИМОВ И СОПРОВОЖДЕНИЯ МАССОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ОПЫТНЫХ ТВС РЕАКТОРА СМ С ПОВЫШЕННОЙ ЗАГРУЗКОЙ УРАНА

В.А. Цыканов^{*}, В.А.Старков^{*}, А.П. Малков^{*} М.Н. Святкин^{*}, <u>А.В. Клинов^{*}</u>, <u>А.Л. Петелин^{*}</u>, <u>Ю.А. Краснов^{*}</u>, <u>Ю.Б.Чертков^{**}</u> *ОАО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград* Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г.Томск

На основании результатов расчетно-экспериментальных исследований обоснованы техническая возможность и безопасность, реализован перевод активной зоны реактора СМ на твэлы с повышенным содержанием урана с применением штатной процедуры перегрузки топлива. Проведены экспериментальные исследования физических характеристик активной зоны и массовые испытания опытных ТВС на основе твэлов с загрузкой 6 г ²³⁵U. Проведен анализ технико-экономических показателей реактора с опытными ТВС. Получены данные, необходимые для внесения изменений в проектную документацию реактора и перевода новых ТВС из категории опытных сборок в категорию штатных.

Ключевые слова: исследовательский реактор, эффекты реактивности, мощность реактора, коэффициенты неравномерности распределения энерговыделения, плотность теплового потока с поверхности твэлов, годовое потребление топлива, профилирование расхода теплоносителя, максимальная температура топлива. **Key words:** research reactor, reactivity effects, reactor power peaking factor, density of heat flow from the rod surface, annual fuel consumption, coolant flow rate profiling, maximum fuel temperature.

введение

P

На первом этапе модернизации активной зоны (а.з.) реактора СМ предусматривается размещение в ее топливной части дополнительно двух петлевых материаловедческих каналов Ø64 мм и четырех ампульных Ø24.5 мм, предназначенных для ускоренных высокодозных облучений материалов ядерной техники, и компенсация потерь реактивности за счет использования твэлов с увеличенным содержанием U-235 с пяти до шести граммов [1, 2]. Этот этап включает в себя и решение задачи перевода а.з. на твэлы с повышенным содержанием урана.

© В.А. Цыканов, В.А. Старков, А.П. Малков М.Н. Святкин, А.В. Клинов, А.Л. Петелин, Ю.А. Краснов, Ю.Б. Чертков, 2011

ΦИЗИКА И ТЕХНИКА РЕАКТОРОВ

Цель работы заключалась в расчетно-экспериментальном обосновании технической возможности, безопасности и методики реализации перевода реактора СМ на топливо с повышенной плотностью по урану с использованием штатной процедуры перегрузки топлива без применения специальных дополнительных мер и, в дальнейшем, в экспериментальном подтверждении нейтронно-физических и технико-экономических характеристик реактора с модернизированной активной зоной.

В процессе перевода реактора на новое топливо решали следующие задачи:

 выбор приемлемых компоновок активной зоны для каждой очередной кампании на основании результатов расчетов с соответствующим анализом эксплуатационных запасов и обоснованием характеристик безопасности реактора;

отработка возможных алгоритмов перегрузок активной зоны;

• экспериментальное исследование изменения физических характеристик активной зоны при поэтапной замене топлива;

 по завершении перевода реактора на новое топливо получение опытных данных для внесения необходимых изменений в проектную документацию и проведения уточняющего анализа безопасности реакторной установки.

Для обеспечения надежности и достоверности определения физических характеристик реактора, важных для обеспечения его безопасности в процессе перевода активной зоны на новое топливо, применяли комплексный подход, сочетающий расчетные и экспериментальные методы. Расчеты в обоснование выбранных компоновок активной зоны для каждой кампании выполняли с использованием прецизионной программы, реализующей аналоговый метод Монте-Карло. Для поисковых исследований по выбору вариантов компоновки активной зоны применялись быстродействующие инженерные методики определения физических характеристик реактора. Экспериментальные исследования по оценке максимальных значений коэффициентов неравномерности распределения энерговыделения, моделирующие отдельные компоновки активной зоны, были предварительно проведены на критической сборке – физической модели реактора. Измерения запаса реактивности активной зоны эффектов реактивности и эффективности органов регулирования проводились непосредственно на реакторе в процессе перегрузок топлива [3].

В статье представлены результаты проведенных исследований, опытные данные по показателям использования топлива, выполнен анализ характеристик работы установки в переходный период.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ И КОНТРОЛЮ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКТОРА В ПРОЦЕССЕ ПЕРЕВОДА НА НОВОЕ ТОПЛИВО

Замену штатных ТВС на новые необходимо было провести поэтапно в процессе плановых перегрузок топлива без нарушения проектных пределов эксплуатации реактора, его графика работы, связанного с выполнением научных и коммерческих программ и в соответствии с требованиями ядерной безопасности.

При выборе процедуры загрузки реактора опытными ТВС для проведения их массовых испытаний, определения необходимого объема исследований и обоснований были учтены следующие обстоятельства:

• результаты предварительных расчетно-экспериментальных исследований [4] подтвердили возможность и безопасность перевода реактора СМ на новое топливо в процессе плановой эксплуатации;

 представительные успешные испытания твэлов с увеличенной загрузкой топлива во всех возможных режимах работы (при средних и максимальных нагрузках, в составе фрагмента ТВС в петлевой установке и в составе трех типов полномасштабных опытных ТВС непосредственно в активной зоне при штатных режимах и условиях эксплуатации) подтвердили их работоспособность [5–7];

• неразрушающие и разрушающие послереакторные исследования также подтвердили сохранение характеристик работоспособности твэлов на приемлемом уровне [8–10].

Из этих соображений была принята схема действий, включающая в себя следующие этапы исследований, подготовки и рассмотрения документации, обосновывающей безопасность реактора:

 разработка и согласование с надзорными органами программы массовых испытаний 50-ти опытных ТВС в активной зоне реактора СМ при штатных режимах эксплуатации с поэтапной заменой штатных ТВС на опытные в процессе плановых перегрузок;

 расчетное обоснование безопасности для каждой планируемой кампании в переходный период;

• экспериментальное определение эффективности органов СУЗ, запаса реактивности и подкритичности активной зоны по завершении перегрузочных работ перед каждой кампанией с обеспечением распада ¹³⁵Хе до их начала;

• экспериментальное определение физических характеристик активной зоны, важных для безопасности, после замены всех штатных ТВС на опытные с увеличенной загрузкой топлива;

• оформление пояснительной записки к техническому проекту активной зоны с новым топливом;

 оформление документации по переводу ТВС новых типов из категории опытных в категорию штатных;

• оформление дополнения к отчету по обоснованию безопасности реактора;

• внесение необходимых изменений в эксплуатационную документацию.

Принципы, которые должны выполняться при расчетном моделировании перегрузок переходного режима работы реактора, формулировались следующим образом:

 подкритичность реактора в начале кампании с взведенными стержнями АЗ исходя из требований НТД и с учетом сложившейся практики должна быть не менее 1,1%∆К/К;



Рис. 1. Схема активной зоны реактора СМ: (1 – (5 – типовые ячейки реактора; А – центральный компенсирующий орган (ЦКО); В – центральный замедляющий блок (ЦЗБ); в ячейках 41, 91, 96 и 46 находятся регуляторы КО-1...КО-4 соответственно

 запас реактивности в начале кампании должен обеспечивать энерговыработку не меньше 850 МВт.сут;

• относительные значения мощности ТВС не должны превышать следующих значений (рис. 1): для ячеек типа 54 – 2,02; для ячеек типа 55 – 1,45; для ячеек типа 44 – 1,54; для ячеек типа 45 – 1,26; для ячеек типа 46 – 0,89;

• запас до кризиса теплообмена с учетом гидропрофилирования расхода теплоносителя по типовым ячейкам должен быть не менее 1,2.

ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА И РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ

MCURR [11] – трехмерная программа нейтронно-физического расчета ядерных реакторов, в которой реализован аналоговый метод Монте-Карло совместного моделирования траекторий нейтронов и гамма-квантов в трехмерной геометрии. Константное обеспечение программы MCU-RR базируется на библиотеке ядерных данных DLC/MCUDAT-2.1. На основе этой программы разработана прецизионная трехмерная расчетная модель активной зоны реактора [12], позволяющая проводить расчет распределения энерговыделения и плотности теплового потока с поверхности каждого твэла в процессе выгорания топлива. С помощью данной программы оценивалось детальное (потвэльное) распределение энерговыделения по сечению активной зоны реактора СМ, коэффициенты неравномерности энерговыделения по сечению ТВС и реактора, максимальные тепловые потоки с поверхности твэлов, запасы до кризиса теплообмена.

TIGR-SM [13] – трехмерная 4-групповая программа для инженерных нейтроннофизических расчетов реактора СМ, позволяющая определять эффективный коэффициент размножения нейтронов, распределение плотности потоков нейтронов и энерговыделение по объему реактора в стационарном состоянии и в процессе кампании. С ее помощью оценивались параметры реактора на предварительной стадии расчетов. При проведении расчетов определялись максимальные тепловые нагрузки (плотность теплового потока) в твэлах опытных и штатных TBC при состоянии активной зоны с наибольшей неравномерностью распределения энерговыделения, характерном для начала кампании – при положении регуляторов ЦКО – 0 мм и КО – 280 мм [14] (диапазон изменения положения регуляторов: 0 мм – вверху; 350 мм – внизу). Параллельно с параметрами компоновок активной зоны для исследуемых кампаний рассчитывались (для сравнения) параметры компоновок для предшествующих кампаний.

Инженерная аппроксимационная методика разработана, аттестована и введена в эксплуатацию для расчета распределения мощности и выгорания топлива в реакторе СМ в ходе кампании [15]. При расчетах учитываются распределение топлива (глубина выгорания ²³⁵U) в ячейках активной зоны и изменение положения органов СУЗ в ходе кампании. Методика построена на аппроксимационных зависимостях между рядами опорных полей энерговыделения в активной зоне, рассчитанных по программе MCU. Расчетная модель протестирована по результатам экспериментов на критсборке реактора СМ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

Экспериментальные исследования проводили на критической сборке (физической модели реактора СМ) перед выполнением всей программы и непосредственно на реакторе в процессе перевода реактора на новое топливо. Целью последних было экспериментальное определение эффективности органов СУЗ, запаса реактивности и подкритичности активной зоны по завершении перегрузочных работ перед каждой следующей кампанией.

РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПЛАНИРУЕМЫХ КОМПОНОВОК АКТИВНОЙ ЗОНЫ

Выбор приемлемой, с точки зрения безопасности и продолжительности кампании, компоновки активной зоны проводили на основании результатов вариантных расчетов для каждой кампании, начиная с 14.01.2005 г. Для каждой кампании рассчитывали характеристики от четырех до шести вариантов загрузки активной зоны.

На предварительной стадии характеристики предложенных вариантов компоновок (включая предшествующую началу перехода кампанию) были рассчитаны по программе TIGR-SM. При расчетах определялись запас реактивности реактора в горячем отравленном состоянии, длительность кампаний, распределение энерговыделения по ячейкам активной зоны при разных положениях регуляторов, включая и состояние с положением ЦКО и КО – 0 мм и 280 мм соответственно. В результате анализа полученных данных компоновка активной зоны уточнялась в соответствии с критериями, сформулированными выше, и проводился расчет по прецизионному коду [11]. Краткая характеристика кампаний переходного периода представлена в табл. 1.

Таблица 1

Начало	Энерго- выработка, МВт·сут	Количество опытных ТВС в реакторе, шт.		Среднее выгорание топлива в активной зоне, %		Масса ²³⁵ U в активной зоне, кг	
кампании		необлу- ченных	всего	начало кампании	конец кампании	начало кампании	конец кампании
14.01.05	969,6	4	4	13,5	17,9	25,9	24,6
27.01.05	831,6	3	7	14,9	18,5	26,0	24,9
10.02.05	823,9	3	10	15,7	19,2	26,4	25,3
22.02.05	748,8	3	13	16,0	19,2	26,6	25,6
04.03.05	753,0	3	16	15,7	18,9	27,1	26,1
18.03.05	832,3	2	18	16,1	19,6	27,4	26,3
29.03.05	978,3	3	21	16,3	20,2	27,9	26,5
15.04.05	919,7	1	22	18,1	21,8	27,4	26,2
27.04.05	1065,9	3	25	18,4	22,6	27,6	26,2
13.05.05	900,5	3	28	19,7	23,3	27,6	26,3
25.05.05	922,3	3	28	19,7	23,3	27,8	26,6
15.07.05	820,9	6	32	18,8	21,9	28,8	27,7

Основные характеристики кампаний переходного периода

Реактивностные характеристики

Результаты градуировок РО СУЗ реактора СМ, проведенных в переходный период, и усредненные данные за 2004 г. представлены в табл. 2.

Из полученных результатов следует, что за время перевода реактора СМ на ТВС с увеличенной загрузкой ²³⁵U реактивностные характеристики активной зоны изменились незначительно по сравнению с 2004 г. В то же время при этом существенно выросло количество топлива (масса ²³⁵U) в активной зоне. Относительно малое влияние увеличения массы делящихся нуклидов на реактивностные характеристики обусловлено самоэкранированием топлива (эффект реактивности при

Таблица 2

Эффективность РО СУЗ, запас реактивности и подкритичность активной зоны реактора СМ

Дата	Положение ЦКО в	Эффективность, $eta_{_{\mathfrak{s}\!\varphi\!\varphi}}$				Запас	Подкритич-
	критсостоянии, мм	цко	КО-1-4	ЦКО+КО	A3-1-4	реактив- ности, β _{эφφ}	ность, $\beta_{_{_{9}\varphi\varphi}}$
13.01.05	148	3,9	10,1	14,0	4,0	11,7	2,3
09.02.05	130	3,6	8,8	12,4	3,7	10,0	2,4
17.03.05	182	4,1	9,4	13,5	3,7	11,6	1,9
15.04.05	177	4,0	8,7	12,7	3,5	10,8	1,9
13.05.05	199	3,9	8,3	12,2	3,5	10,7	1,5
14.07.05	67	3,9	10,4	14,3	4,6	10,8	3,5
Средние	67–199	3,9	9,3	13,2	3,8	10,9	2,3
2004 г.	91–208	3,7	9,0	12,7	3,7	10,6	2,1

загрузке необлученной опытной ТВС близок к эффекту реактивности от загрузки штатной сборки) и существенным увеличением количества продуктов деления в активной зоне.

Показатели использования топлива

Основные эксплуатационные характеристики активной зоны реактора СМ, связанные с использованием топлива, приведены в табл. 3.

Сравнение с данными 2004 г. показало, что на начало кампании количество топлива (масса ²³⁵U) в активной зоне увеличилось в среднем на 10,7% (с 25,3 до

Начало кампании	Масса ²³⁵ U в а.з., кг		Среднее выгорание ²³⁵ U в а.3, %		Масса осколков деления ²³⁵ U, кг		Среднее выгорание в
	начало кампании	конец кампании	начало кампании	конец кампании	начало кампании	конец кампании	выгружаемых ТВС, %
14.01.05	25,94	24,63	13,52	17,88	4,05	5,36	32,18
27.01.05	26,02	24,90	14,85	18,52	4,54	5,66	32,29
10.02.05	26,36	25,25	15,67	19,22	4,90	6,01	34,10
22.02.05	26,60	25,59	15,95	19,15	5,05	6,06	35,29
04.03.05	27,14	26,13	15,72	18,88	5,06	6,08	35,76
18.03.05	27,42	26,30	16,13	19,57	5,28	6,40	35,09
29.03.05	27,85	26,53	16,26	20,24	5,41	6,73	34,81
15.04.05	27,40	26,16	18,07	21,79	6,05	7,29	37,72
27.04.05	27,62	26,18	18,39	22,64	6,22	7,66	32,01
13.05.05	27,56	26,34	19,72	23,27	6,77	7,99	37,10
25.05.05	27,82	26,58	19,73	23,32	6,84	8,08	32,10
15.07.05	28,77	27,66	18,75	21,88	6,64	7,75	39,57
26.07.05	28,39	27,19	19,45	22,86	6,86	8,06	39,00
14.08.05	27,89	27,04	20,47	22,90	7,18	8,03	38,47

Топливные характеристики активной зоны реактора СМ

Таблица 3

28 кг), среднее выгорание топлива – в 1,3 раза (с 14,7 до 19,4%), масса осколков деления ²³⁵U – в 1,5 раза (с 4,4 до 6,8 кг), среднее выгорание топлива в выгружаемых ТВС – в 1,16 раза (с 31,4 до 36,4%).

Таким образом, наряду с естественным увеличением количества топлива в активной зоне реактора, вызванным заменой твэлов с загрузкой 5г ²³⁵U на твэлы с загрузкой 6г ²³⁵U, произошло увеличение его среднего выгорания в активной зоне и в выгружаемых ТВС.

Для сравнения экономических показателей использования топлива в переходный период проведен анализ фактических показателей его эксплуатации с 14.01.2005 по 21.08.2005 гг. (всего 14 кампаний). Данные об использовании топлива в рассматриваемый период приведены в табл. 4. Там же приведены усредненные фактические данные об использовании топлива за время эксплуатации реактора СМ и полученные на их основании оценки соответствующих параметров для штатной активной зоны (выделены серым цветом).

Таблица 4

Параметр	Опытные ТВС	Штатные ТВС	
Энерговыработка, МВт∙сут	12000		
Расход ТВС на 1000 МВт∙сут	3,31	4,82	
Общее потребление ТВС, шт.	40	58	
Общее потребление ²³⁵ U, кг	43,9	53,4	

Основные показатели использования топлива в реакторе СМ

Из полученных результатов следует, что для одинаковой энерговыработки было использовано примерно на 18 опытных ТВС меньше. При этом сэкономлено около 9,5 кг²³⁵U, из которого можно было бы изготовить 1900 твэлов с загрузкой 5г²³⁵U (для комплектации 10-ти штатных ТВС) или 1583 твэла с загрузкой 6г²³⁵U (для комплектации 8,4 опытных ТВС). Таким образом, экономия топлива в переходный период составила около 40% в количестве использованных ТВС и более 20% в высокообогащенном уране по сравнению с предыдущим периодом работы реактора со штатным топливом при нормировке на одинаковую энерговыработку.

Эксплуатационные и экономические показатели работы реактора СМ-3 во время перевода на ТВС новых типов показали перспективность их дальнейшего использования. Отсутствие случаев разгерметизации в процессе массовых испытаний опытных ТВС служит доказательством работоспособности твэлов с увеличенной загрузкой топлива в широком диапазоне тепловых нагрузок (до 15 МВт/м²) и выгораний (до 50% в среднем по ТВС). При соблюдении действующего графика работы реактора получена значительная годовая экономия в использовании свежего топлива (табл. 5): в 2005 г. было израсходовано на 24 ТВС меньше, чем в

Таблица 5

Фактические показатели использования топлива в реакторе СМ

Параметр	2003 г.	2004 г.	2005 г.
Энерговыработка, МВт·сут	21125	21923	21639
Годовое потребление ТВС, шт.	106	101	77
Расход ТВС на 1000 МВт∙сут	5,02	4,61	3,56
Годовое потребление урана-235, кг	98,0	92,6	82,9

ΦИЗИКА И ТЕХНИКА РЕАКТОРОВ

2004 г. и на 29 ТВС меньше, чем в 2003 г. Также существенно (в 1,3 раза) снизилось количество свежих ТВС, использованных для получения энерговыработки 1000 МВт-сут.

Для сравнения характеристик реактора со штатной и модернизированной активной зоной в табл. 6 приведены

• опытно-экспериментальные данные для активной зоны из штатных ТВС, полученные в экспериментах в ходе эксплуатации реактора с середины 2002 до конца 2004 гг.;

Физические характеристики реактора СМ

Таблица б

		Активная зона из опытных ТВС		
Параметр	активная зона из штатных ТВС	расчетное значение	экспериментальное значение	
Средний запас реактивности, $eta_{_{ m s}\phi\phi}$	11,2	10,8	10,7	
Средняя суммарная эффективность органов ЦКО и КО, β _{эφφ}	13,2	12,2	13,2	
Стационарное отравление ксеноном, $\beta_{_{s\varphi\varphi}}$	-5,5	-5,1	-5,3	
Эффект от разогрева активной зоны при переходе от нулевой к номинальной мощности, β _{эφφ}	-0,56	-0,65	-0,62	
Температурный коэффициент реактивности при рабочих параметрах активной зоны, β _{эφφ} /°C	-0,018	-0,019	-0,020	
Средний эффект от выгорания и шлакования топлива, β _{зφφ}	-5,5	-5,1	-4,8	
Темп потери реактивности на выгорание топлива, β _{эφφ} /(МВт·сут)	0,0061	0,0032	0,0054	
Мощностной коэффициент реактивности для «горячего отравленного» состояния реактора, β _{эφφ} /МВт	-(4,0±1,3) 10 ⁻³	-(4,0±1,0) 10 ⁻³	-(4,7±0,3) 10 ⁻³	
Эффект реактивности от загрузки свежей ТВС в ячейку с водой:				
ячейка типа 42	0,9	1,5	1,1 ²⁾	
ячейка типа 43	1,2	1,6	1,5 ²⁾ /1,2 ³⁾ /1,1 ⁴⁾	
ячейка типа 52	1,2	1,5	1,5 ²⁾ /1,2 ³⁾ /1,1 ⁴⁾	
ячейка типа 53	1,9	2,1	2,3 ²⁾ /1,7 ⁴⁾	
Эффект реактивности от выгрузки ТВС с выгоранием 35%				
ячейка типа 42	-0,5	-0,7	-0,5 ²⁾	
ячейка типа 43	-0,5	-0,7	$-0.6^{2}/-0.5^{3}/-0.4^{4}$	
ячейка типа 52	-0,4	-0,5	$-0.6^{2}/-0.5^{3}/-0.4^{4}$	
ячейка типа 53	-0,9	-1,0	-1,1 ²⁾ /-0,8 ⁴⁾	

 $^{2)}$ TBC со 188-ю твэлами; $^{3)}$ TBC со 160-ю твэлами; $^{4)}$ TBC со 158-ю твэлами.

расчетные значения для модернизированной активной зоны [3];

• опытно-экспериментальные данные для активной зоны из опытных ТВС, полученные при эксплуатации реактора в 2005 г. и в экспериментах по определению характеристик активной зоны реактора, полностью загруженной опытными ТВС.

По представленным данным можно отметить следующее:

 замена штатных ТВС на опытные не привела к значимому изменению нейтронно-физических характеристик реактора СМ, несмотря на существенное увеличение количества топлива в активной зоне;

• с учетом погрешностей расчетов и экспериментов расчетные оценки характеристик модернизированной активной зоны достаточно хорошо согласуются с полученными опытно-экспериментальными данными.

Результаты расчетов и экспериментов на физмодели реактора показали, что переход на твэлы с увеличенной загрузкой урана не влияет на распределение энерговыделения по сечению активной зоны и высоте ТВС при одинаковом распределении топлива (выгорания) по тепловыделяющим сборкам. Коэффициенты неравномерности распределения энерговыделения по сечению ТВС увеличиваются на 10% для ячеек типа 46 и на (5–7)% для ячеек других типов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения работы

 проведены предварительные расчетно-экспериментальные исследования изменения физических характеристик активной зоны, включая эффекты реактивности и коэффициенты неравномерности энерговыделения при переходе на новое топливо;

 разработана программа испытаний представительной партии из 50-ти опытных ТВС;

 разработаны и апробированы на практике возможные алгоритмы перегрузок активной зоны при переводе реактора на новое топливо;

 произведена поэтапная в течение 12-ти кампаний замена штатных ТВС реактора СМ в активной зоне на новые топливные сборки с обоснованием безопасности работы реактора для каждой кампании;

 получена и проанализирована в процессе перевода реактора на новое топливо экспериментальная информация об изменении реактивностных характеристик активной зоны и о фактических показателях использования топлива;

• получены полный объем информации, позволяющий внести необходимые изменения в проектную документацию реактора СМ и обосновать возможность перевода новых ТВС из категории опытных в категорию штатных топливных сборок, и фактические показатели использования топлива, подтверждающие экономическую эффективность перевода реактора на новые ТВС.

Впервые выполнено прогнозное расчетное моделирование планируемых кампаний реактора СМ при поэтапном переводе активной зоны на новое топливо с использованием прецизионных и инженерных методик расчета, а также экспериментальных результатов, полученных на критсборке. Получены нейтронно-физические характеристики реактора СМ с новым составом активной зоны.

Произведен перевод реактора СМ на новое топливо с соблюдением утвержденного графика работы реактора с выполнением обязательств по наработке радионуклидов и проводимых программ исследований. В процессе перевода не допущено нарушения проектных пределов для реакторной установки и условий ее безопасности. В переходный период достигнута фактическая экономия топлива (около 40% в количестве использованных ТВС при достижении энерговыработки в 12000 МВт-сут и около 20% в использовании высокообогащенного урана).

Литература

1. Цыканов В.А., Святкин М.Н., Клинов А.В., Старков В.А. Модернизация активной зоны реактора СМ/Международная научно-техническая конференция «Исследовательские реакторы: наука и высокие технологии» (Димитровград, 25-29 июня 2001 г.): Сборник докладов. Т. 2. Ч. 1. – Димитровград: ФГУП «ГНЦРФ НИИАР», 2002. – С. 3-16.

2. *Клинов А.В., Цыканов В.А., Старков В.А., Пименов В.В. и др.* Модернизация активной зоны реактора СМ для решения задач материаловедения//Атомная энергия. – 2002. – Т. 93. – № 3. – С. 167.

3. *Малков А.П., Краснов Ю.А. Петелин А.Л.* Методические особенности и результаты экспериментальных исследований физических характеристик реактора СМ при переходе на новое топливо//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – №4. – С. 79-85.

4. *Цыканов В.А., Клинов А.В., Старков В.А*. Основные итоги первого этапа модернизации активной зоны реактора СМ//Атомная энергия. 2007. – Т. 102. – Вып. 2. – С. 86-92.

5. Калинина Н.К., Старков В.А., Клинов А.В., Мельдер Р.Р. Результаты испытаний твэлов реактора СМ с повышенным содержанием ²³⁵U при средних и максимальных тепловых нагрузках/Отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2004 г. НИИАР. – С. 18-19.

6. *Цыканов В.А., Чертков Ю.Б., Старков В.А., Федосеев В.Е. и др.* Реакторные испытания ТВС с повышенной загрузкой урана в активной зоне реактора СМ/Отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2004 г. НИИАР. – С. 20-23.

7. Бурукин В.П., Клинов А.В, Старков В.А. и др. Результаты исследований в обоснование работоспособности ураноемкого твэла реактора СМ/Сб. тр. (ежеквартальный сборник научных статей) ФГУП «ГНЦРФ НИИАР». – 2003. – Вып. 2.С. 35-46.

8. *Цыканов В.А., Старков В.А., Чечеткина З.И., Новоселов А.Е. и др.* Оценка работоспособности твэлов реактора СМ с увеличенным содержанием урана/Сб. докл. международной конф. «Исследовательские реакторы в XXI в.» (Москва, НИКИЭТ. 21-24 июня 2006 г.).

9. *Чечеткина З.И., Старков В.А., Новоселов А.Е. и др.* Комплекс исследований твэлов реактора СМ в обоснование их эксплуатации при повышенных параметрах/Отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2006 г. НИИАР. – С. 36.

10. Цыканов В.А., Чечеткина З.И., Старков В.А., Чертков Ю.Б. и др. Основные результаты исследований твэлов реактора СМ с повышенным содержанием урана/Сб. тр. (ежеквартальный сборник научных статей) ФГУП «ГНЦРФ НИИАР». – 2005. Вып. 3. – С. 3-20.

11. Гомин Е.А., Гуревич М.И., Майоров Л.В., Марин С.В. Описание применения и инструкция для пользователя программой MCU-RFFI расчета методом Монте-Карло нейтронно-физических характеристик ядерных реакторов/Препринт ИАЭ-5837/5. – М.: ИАЭ, 1994.

12. Бестужева И.В., Чертков Ю.Б., Старков В.А. и др. Усовершенствованная расчетная модель реактора СМ и результаты ее тестирования/Отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2003 г. НИИАР. – С. 17-19.

13. Алферов В.П., Краснов Ю.А., Малков А.П., Старков В.А., Чертков Ю.Б., Щуровская М.В. Особенности расчетного сопровождения эксплуатации реактора СМ/Тез. докл. XII семинара по проблемам физики реакторов (Москва, 2-6 сентября 2002 г.). – С.138-140.

14. *Клинов А.В., Старков В.А., Чертков Ю.Б.* Изменение характеристик активной зоны реактора СМ при изменении положения регулирующих органов//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – № 4. – С. 55-63

15. Краснов Ю.А., Малков А.П., Пименов В.В., Пименова О.В. Расчетно-экспериментальные исследования распределения энерговыделения в активных зонах реакторов СМиРБТ/Сборник трудов. – Димитровград: ФГУП «ГНЦРФ НИИАР», 2002. – Вып. 3. – С. 52-63.

Поступила в редакцию 8.08.2011

УДК 621.039.519

Results of Calculated Experimental Justification of Support and Conditions of Mass Tests of SM Experimental Fuel Assemblies with Increased Uranium Load \V.A.Tsikanov, V.A. Starkov, A.P.Malkov, M.N. Svyatkin, A.V. Klinov, A.L. Petelin, Yu.A. Krasnov, Yu.B. Chertkov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 102 pages, 6 tables, 1 illustration. – References, 15 titles.

The technical feasibility and safety of SM core conversion for operation with increased uranium content rods using the standard fuel reloading were justified on the basis of the results of calculated experimental investigations. The experimental investigations of core physical characteristics and the mass tests of the experimental fuel assemblies on the basis of the rods loaded with 6g 235U were carried out. Technical-economical characteristics of the reactor with experimental FA were analyzed. The data required for amendments of the reactor design documentation and conversion of the new FA from the experimental assembly category to the standard one are obtained.

УДК 621.039.534

Experimental Sample of IVA-M Device for Monitoring of Hydrogen in Sodium Coolant \V.V. Alekseev, G.P. Sergeev, P.S. Kozub, V.V. Matyukhin, A.P. Sorokin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 9 pages, 2 tables, 5 illustrations. – References, 5 titles.

Experimental sample of IVA-M device for Monitoring of hydrogen in sodium is developed which includes the primary converter from the indicator IVA- 1Y (high vacuum block with nickel membrane and magnet pump NMD-0,0063, in addition equipped by thermostat), structurally advanced sodium block with recuperator and graduation block.

The chosen design of technological (sodium) block of IVA-M has the nominal sodium flow rate 0,1 m3/h (WILLOW – AT), much smaller dimensions and reduced approximately in 3 time transport time in sodium path of device in comparison with IVA- 19.

The experimental sample of IVA-M device is manufactured and tested on sodium loop ZU-3M.

The tests of the experimental sample of IVA-M device e have shown conformity of its characteristics to parameters stipulated by technical project on development of the device.

УДК 621.039.58

Risk Assessment for NPPs with RBMK Reactors \R.T. Islamov, A.A. Derevyankin, I.V. Zhukov, M.A. Berberova, S.S. Dyadyura, Ju.A. Mardashova, R.Sh. Kalmetiev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 7 pages, 2 tables, 2 illustrations. – References, 7 titles.

We have made the comparative risk assessment for NPPs with RBMK reactors and describe the results of risk index calculations required for Kursk NPP safety passports, which are compulsory for each hazardous industrial facility in accordance with the legislation of the Russia Federation. The output of this research is the assessment of risk index systems in physical and economical terms, social risk (F-N curves) and material damage (F-G curves) charts for Kursk NPP.

УДК 621.039.566

Limiting State Estimation of Damaged Pipe Bend Nuclear Power Plant\V.M. Markochev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 6 pages, 4 illustrations. – References, 1 title.

The method of calculating the limit state of the damaged section bend of pipeline, based on test results of smooth specimen, and the corresponding notched. Geometry of notched specimen is entirely dependent on the ratio of yield strength to ultimate strength. Design scheme is a simplified version of the method of real elements, the criterion of destruction – the strain criterion.