

во всех случаях эффективность образцов и макетов пэлов из диспрозия ниже эффективности из карбида бора приблизительно на 25%;

результаты расчета относительной эффективности пэлов хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Расчеты экспериментов выполнены при поддержке РФФИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрианов Г.Я., Ионов В.С., Крайнов Ю.А., Кравченко Ю.Я. Критические стенды и методики исследования нейтронно-физических характеристик реакторов типа ВВЭР. — Тезисы докл. VIII Межд. семинара по проблемам физики реакторов. Т. 2. МИФИ, Волга-93. М., 1993.
2. Экспериментальные исследования по физике уран-водных решеток типа ВВЭР. Сб. трудов ВМК. Т. 1. Будапешт, 1984.
3. Комиссаров Л.В., Андрианов Г.Я. Исследование физических свойств активной зоны ВВЭР на критических сборках. Тезисы докл. симп. по экспоненциальным и критическим экспериментам. Амстердам, 1963.
4. Абагян Л.П., Алексеев Н.И., Брызгалов Л.П. и др. Программа MSU для расчета методом Монте-Карло нейтронно-физических характеристик ядерных реакторов. Верификация: Препринт IAE-5751/5, 1994.
5. Лизоркин М.П. Аннотация программы ПЕРМАК-У. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов, 1988, вып. 4, с. 56—59.
6. Алексеев П.Н., Зарицкий С.М. Формулы теории возмущений для двумерных моделей реакторов. — Там же, 1982, вып. 7, с. 19—23.
7. Сидоренко В.Д., Пшенин В.В. Инженерные методы и программы подготовки малогрупповых констант для расчетов активных зон с легководными замедлителями. — Там же, 1985, вып. 4, с. 4—16.

Поступила в Редакцию 21.06.96

УДК 621.039.54

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ТВЭЛОВ ВВЭР-440 ПРИ ГЛУБОКОМ ВЫГОРАНИИ (на примере 3-го энергоблока Кольской АЭС)

*Щеглов А.С., Проселков В.Н. (ИЯР РНЦ «Курчатовский ин-т»), Смирнов А.В.,
Смирнов В.П. (ГНЦ РФ — НИИАР), Апаньев Ю.А. (ОКБ «Гидропресс»),
Цибуля В.А., Колосовский В.Г. (АООТ «Машиностроительный завод»),
Панин В.Н., Пыткин Ю.Н. (Кольская АЭС)*

В статье приведены результаты моделирования поведения твэлов двух ТВС, которые эксплуатировались в составе 5—8-й и 5—9-й топливных загрузок активной зоны 3-го энергоблока Кольской АЭС и достигли выгорания урана ~ 46 МВт·сут/кг за 4 года и ~ 49 МВт·сут/кг за 5 лет соответственно.

В исследовании использовалась программа теплофизического расчета PIN-mod2 [1], предназначенная для моделирования поведения твэлов ВВЭР в квазистационарном режиме. Программа учитывает изменение условий эксплуатации (линейной тепловой нагрузки, температуры теплоносителя, способов охлаждения, потока быстрых нейтронов), конструкционные и технологические параметры, а также основные процессы, которые происходят при работе и влияют на поведение твэла. К их числу относятся: радиационное уплотнение, термическое расширение, распухание, ползучесть и растрескивание топлива;

ползучесть, термическое расширение, деформация и радиационный рост оболочки; механическое взаимодействие топлива и оболочки;

выход газообразных продуктов деления из топлива и обусловленное им изменение количества и состава газовой среды под оболочкой твэла, ее теплопроводности и длины температурного скачка на зазоре или контакте топлива и оболочки;

перемешивание газовой среды под оболочкой;
 изменение плотности энерговыделения по радиусу топлива и обусловленная этим неравномерность выгорания по радиусу, в том числе и поверхностный так называемый рим-эффект [2];

изменение теплопроводности топлива от температуры и выгорания;
 возможные перестройка структуры и плавление топлива, изменение размера центрального отверстия;

изменение свободного объема под оболочкой, в том числе за счет ее удлинения и др.
 В программе PIN-mod2 при моделировании поведения топлива и оболочки используется представление их в виде коаксиальных цилиндров, имеющих постоянные по высоте начальные геометрические и конструкционные параметры.

Обе ТВС изготовлены в мае 1986 г. Топливом служили спеченные таблетки из диоксида урана, обогащенного по ^{235}U до 4,4%. Таблетки не имели фасок. В качестве материала оболочек и концевых деталей твэлов использовался сплав $\text{Zr}-1\% \text{Nb}$. Чехловая труба выполнена из сплава $\text{Zr}-2,5\text{Nb}$, головка, хвостовик и дистанционирующие решетки — из стали X18H10T. Температура теплоносителя на входе в реактор и его подогрев в различные периоды эксплуатации не превышали 265 и 30 °C. Давление в первом контуре составляло 12,3 МПа.

В 5—8-м топливных циклах 15 раз срабатывала аварийная защита АЗ-1, в 9-м топливном цикле срабатываний АЗ-1 не было.

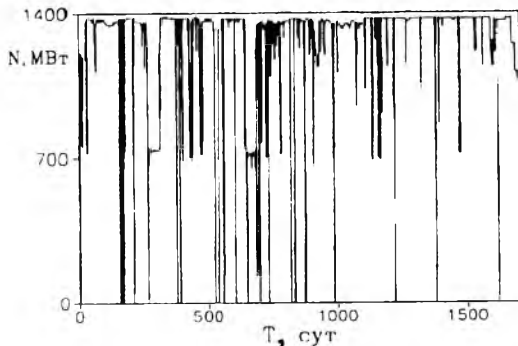
По результатам контроля герметичности оболочек твэлов рассматриваемые ТВС не содержали негерметичных твэлов.

Особо отметим, что вторая ТВС на четвертом году работы (8-й цикл) находилась рядом с ТВС 6-й группы СУЗ (рабочей), что привело к значительной деформации энерговыделения по высоте.

Для построения истории мощности твэлов (временных зависимостей распределения линейной мощности, потока быстрых нейтронов и температуры теплоносителя по высоте твэла) использовали результаты нейтронно-физических расчетов (энерговыделения по высоте для твэлов и ТВС, подогрева теплоносителя в ТВС) в эффективных сутках работы и историю работы реакторной установки (мощность, температуру теплоносителя на входе). На рис. 1 приведен упрощенный график нагрузки реакторной установки 3-го энергоблока Кольской АЭС за период с начала 5-го по конец 9-го топливного цикла, периоды между плановыми ежегодными перегрузками топлива исключены.

Историю мощности и глубину выгорания топлива твэлов и ТВС рассчитывали с применением данных эксплуатации 3-го энергоблока Кольской АЭС в ОКБ «Гидропресс» и ИЯР РНЦ «Курчатовский ин-т» по программам БИПР-7 и ПЕРМАК [3]. В расчете принималось, что масса диоксида урана в ТВС равна номинальной, обогащение по ^{235}U 4,4%. Расчетное среднее по ТВС выгорание составило (по годам работы) 9,4 (9,6) — 24,1 (24,3) — 34,1 (34,6) — 45,88 (46,2) МВт·сут/кг для первой ТВС, 5,4 (5,6) — 18,4 (18,6) — 28,7 (29,2) — 41,3 (41,9) — 49,33 (50,4) МВт·сут/кг для второй ТВС. В скобках приведены данные расчетов Кольской АЭС.

В связи с разбросом конструкционных и геометрических параметров топливных таблеток, оболочек и твэла в целом проводился расчет для нескольких вариантов по исходному эффективному зазору топливо—оболочка (зазору с учетом возможного уменьшения диаметра таблетки из-за радиационного уплотнения топлива), охватывающих с большим запасом возможные состояния реальных твэлов. Проводились рас-



Р и с. 1. График нагрузки реакторной установки 3-го энергоблока Кольской АЭС

четы для варианта максимального, среднего, минимального эффективного зазора (табл. 1). Отметим, что максимальный или минимальный эффективный зазор не может реализоваться по всему твэлу (при этом, в частности, не будут выполняться требования нормативной документации по массе и длине топливного столба), но возможным является, например, попадание таблетки, имеющей параметры по варианту максимального эффективного зазора, в то место, где оболочка имеет внутренний диаметр, соответствующий этому же варианту. В связи с малостью перетечек тепла между таблетками в аксиальном направлении [4] в такой таблетке максимальная температура в начале работы будет близка к рассчитанной по варианту максимального эффективного зазора. В качестве реально самого неблагоприятного (по выходу газообразных продуктов деления и давлению газа под оболочкой) твэла рассматривался вариант максимально реального эффективного зазора.

Т а б л и ц а 1. Параметры твэла для различных расчетных вариантов

Параметр	Эффективный зазор			
	максимальный	максимально реальный	средний	минимальный
Диаметр таблетки, мм:				
внутренний	1,2	1,4	1,6	2,0
наружный	7,54	7,55	7,565	7,59
Внутренний диаметр оболочки, мм	7,8	7,78	7,76	7,72
Начальная плотность топлива, г/см ³	10,43	10,55	10,58	10,73

Переносим результаты расчетов при различных вариантах на реальные твэлы, рассмотрим следующий пример. Пусть в каком-либо твэле эффективные зазоры топливо—оболочка распределены поровну по вариантам максимального и минимального эффективного зазора. По сравнению с вариантом среднего зазора увеличение выхода газообразных продуктов деления от части топлива первого варианта будет больше уменьшения выхода от части топлива второго варианта. Поэтому в качестве наиболее близких к реальности по рассчитанному давлению газа и выходу газообразных продуктов деления следует принимать промежуточные между вариантами среднего и максимально реального эффективного зазора, ориентируясь на расчеты локальных характеристик твэла (максимальную температуру в начале работы, механическое взаимодействие отдельных таблеток топлива и оболочки) для вариантов максимального и минимального зазора как предельно возможные в локальных участках.

В расчетах принималось, что начальная длина топливного столба 242 см, таблетки топлива не имеют фасок (имеют плоские торцы), масса топлива каждого твэла соответствует указанной заводом-изготовителем, размер зерна топлива 7 мкм, открытая пористость топлива 0,5%, наружный диаметр оболочки 9,15 мм, газ-наполнитель гелий при давлении заполнения 0,6 МПа, объем газосборника 4,2 см³, давление теплоносителя 12,3 МПа, скорость 3,8 м/с, температура на входе соответствует данным эксплуатации, предельное радиационное уплотнение топлива ограничено плотностью 10,68 г/см³ при непревышении усадки по диаметру 0,4%.

До получения данных послереакторных исследований авторами был выполнен [5] расчет характеристик твэлов ТВС, который дал достаточно близкое совпадение с результатами послереакторного исследования. Ниже приведены результаты расчета характеристик некоторых твэлов этих ТВС с учетом изменения зависимости коэффициента диффузии газообразных продуктов деления от выгорания, составляющего более 55 МВт·сут/кг.

Результаты расчета. Рассчитывали 8 и 10 твэлов первой или второй ТВС соответственно, которые являлись наиболее характерными (максимальное или среднее выгорание) и по которым имелись данные послереакторного исследования. Расчет про-

водили в зависимости от эффективных суток работы энергоблока, т.е. так же, как рассчитывается работоспособность твэлов новых топливных циклов. В табл. 2 приведены результаты расчета некоторых параметров указанных твэлов для вариантов среднего и максимально реального эффективного зазора и соответствующие экспериментальные значения. Видно, что расхождение расчетных и экспериментальных данных составляет от $-3,8$ до $5,1\%$ со средним расхождением $2,5\%$ по среднему выгоранию, от $-5,1$ до 2% со средним расхождением $-0,8\%$ по максимальному выгоранию, от -57 до $6,6\%$ со средним расхождением -36% по выходу газообразных продуктов деления для среднего, от -60 до 69% с нулевым средним расхождением для максимально реального эффективного зазора, от -11 до 26% со средним расхождением $1,7\%$ по давлению газа под оболочкой твэла после выгрузки из реактора при начальных условиях для среднего зазора.

Т а б л и ц а 2. Расчетные и экспериментальные параметры твэлов первой (первые 8 твэлов) и второй (10 твэлов) ТВС

Номер твэла	Выгорание, МВт·сут/кг				Выход газообразных продуктов деления, %			Давление газа при нормальных условиях, МПа	
	среднее		максимальное		эксперимент	расчетный для вариантов по зазору		эксперимент	расчетное для среднего варианта по зазору
	эксперимент	расчет	эксперимент	расчет		среднего	максимально реального		
1	50,6	50,7	57,8	56,5	1,22	1,30	2,06	1,13	1,13
2	45,9	47,7	53,0	52,9	0,84	0,55	0,85	0,93	0,99
3	44,0	45,6	50,8	50,6	0,61	0,42	0,63	0,95	0,93
4	42,6	44,3	49,0	49,1	0,58	0,38	0,55	0,87	0,90
5	41,3	43,1	47,6	47,7	0,49	0,36	0,50	0,93	0,88
6	42,6	44,5	48,8	49,3	0,49	0,40	0,59	0,92	0,91
7	44,6	46,4	51,2	51,3	0,76	0,48	0,75	0,95	0,95
8	48,7	48,8	55,1	54,1	1,29	0,73	1,20	1,07	1,04
9	55,3	54,5	63,8	61,6	3,71	3,30	5,83	1,40	1,53
10	50,9	52,1	59,4	58,7	2,08	1,88	3,01	1,13	1,25
11	48,4	49,7	56,5	55,9	1,63	0,80	1,18	1,40	1,04
12	46,9	48,2	54,7	54,1	1,16	0,50	0,72	1,02	0,96
13	48,7	51,2	56,4	57,5	2,28	1,42	2,23	1,18	1,16
14	55,2	53,1	63,0	59,8	3,51	2,25	3,61	1,38	1,32
15	44,4	46,1	52,1	51,6	0,69	0,38	0,53	0,95	0,91
16	45,4	47,3	52,5	52,9	1,12	0,44	0,65	1,00	0,93
17	46,6	48,6	53,6	54,3	2,18	0,58	0,88	1,01	0,99
18	50,4	50,6	57,8	56,7	2,26	1,17	1,82	1,10	1,11

Различие экспериментального и расчетного (характеризующего закладываемую в качестве исходных данных историю мощности твэлов) выгорания топлива обусловлено экспериментальными и расчетными погрешностями, в том числе вследствие неучета реальной истории работы энергоблока, реальной массы топлива в твэлах и ТВС. Так, нейтронно-физические расчеты проводили в предположении, что средняя масса топлива в твэле равна 1087 г. Реально же она составляла 1095 и 1100 г для первой или второй ТВС соответственно (прежде всего из-за отсутствия фасок на таблетках). Занижение реальной массы топлива примерно на 1% привело к занижению полученной в нейтронно-физических расчетах по программам БИПР-7 и ПЕРМАК мощности твэлов и, следовательно, рассчитанного по программе PIN-mod2 выгорания. Кроме того,

пять из представленных в табл. 2 твэлов (№ 1, 8, 9, 14 и 18) являются угловыми в ТВС. Известно, что расчеты по программе ПЕРМАК могут занижать мощность угловых твэлов до 2—4%, поэтому для этих твэлов расчетная глубина выгорания может быть занижена, что особенно четко видно на примере твэла № 14.

Погрешности в задании линейной мощности твэлов и, следовательно, выгорания, невозможность задания точных начальных параметров топлива, оболочки и твэла в целом, а также погрешности расчетной программы привели к существенному различию экспериментального и расчетного выхода газообразных продуктов деления. Тем не менее среднее расхождение по их выходу для варианта максимального реально возможного зазора по 18 твэлам равно нулю.

Различие экспериментального и расчетного давления газа под оболочкой обусловлено не только различием соответствующих значений по выходу газообразных продуктов деления, но и невозможностью знания точного начального давления заполнения (известно, что оно находилось в интервале 0,5—0,7 со средним значением 0,6 МПа), состава газа заполнения с учетом сорбированных газов, свободного объема под оболочкой и погрешностями экспериментов. Отметим, что рассчитанное давление после выгрузки в вариантах среднего и максимального реально возможного эффективного зазора примерно равно, что объясняется большим начальным свободным объемом и выходом газообразных продуктов деления для последних вариантов.

Результаты расчета в реальных сутках работы. После представления истории мощности твэлов в эффективных сутках получали историю мощности твэлов в реальных сутках, учитывая во входных данных изменение нагрузки реакторной установки и повышение линейной мощности вследствие увеличения массы топлива твэла и ТВС. В табл. 3 приведены расчетные значения для наиболее выгоревшего девятого твэла из второй ТВС. Расчеты проводили для различных вариантов по начальным параметрам топлива и оболочки твэлов для трех случаев: без учета коэффициентов запаса (рис. 2, максимальная по высоте линейная мощность твэла 215 Вт/см достигается на 338 сутки работы), с коэффициентом запаса 1,04 по мощности твэла и его выгоранию

Т а б л и ц а 3. Результаты расчета характеристик твэла второй ТВС
для различных расчетных вариантов

Параметр	Вариант по начальным параметрам зазора			
	средний	максимально реальный	средний	средний
	Случай			
	1	1	2	3
Выгорание по твэлу, МВт·сут/кг:				
среднее	54,9	54,6	57,1	54,9
максимальное	62,0	61,8	64,5	62,0
Температура топлива, °С:				
максимальная	999	1076	1028	1043
средняя по кампании	576	628	590	592
Выход газообразных продуктов деления, % образовавшихся	3,64	6,70	6,26	4,25
Давление газа под оболочкой, МПа:				
максимальное	3,74	5,31	5,12	4,06
после выгрузки из реактора	1,58	2,07	2,10	1,68
Изменение радиуса, мкм:				
максимальное по высоте топлива	73		79	
среднее по высоте оболочки	— 29		— 25	
Остаточное удлинение оболочки в аксиальном направлении, мм	12,0		12,4	

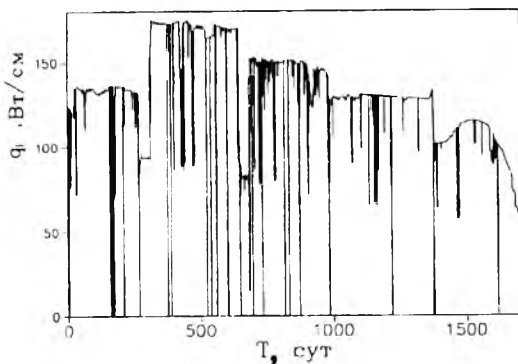
(мощность твэла в любой момент времени была на 4% больше соответствующего значения в первом случае), с коэффициентом запаса 1,06 по мощности твэла (мощность в любой момент времени была на 6% больше соответствующего значения первого случая, а выгорание рассчитывали при нагрузке, тождественной первому случаю). Данные о геометрических изменениях приведены только для наиболее представительных первых двух случаев варианта среднего зазора.

Для наглядности рис. 3 и 4 принималось, что при нулевой мощности реактора температура теплоносителя равна 200 °С.

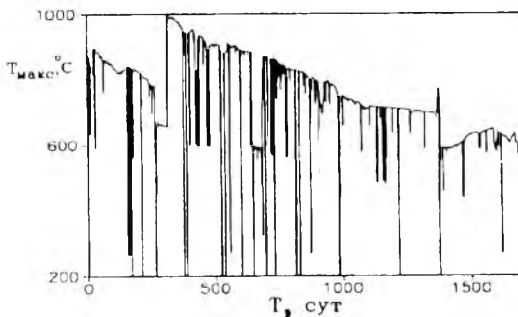
Из рассмотрения рис. 3 следует, что максимальная температура топлива твэла в целом уменьшается в процессе работы, что обусловлено как снижением линейной мощности, так и процессами, происходящими в твэле. На температуру топлива в поперечном сечении влияют линейная мощность, температура теплоносителя и коэффициент теплоотдачи от оболочки к теплоносителю, зазор топливо—оболочка (уменьшающийся из-за ползучести и упругой деформации оболочки, растрескивания, распухания, ползучести и термического расширения топлива и увеличивающийся из-за уплотнения топлива и термического расширения оболочки), эффективная шероховатость наружной поверхности топлива и внутренней поверхности оболочки (шероховатость с учетом взаимной неплоскостности этих поверхностей, обусловленной волнистостью и другими отклонениями от осесимметричности системы топливо—оболочка), теплопроводность газа под оболочкой (уменьшающаяся при выходе газообразных продуктов деления), эффективная теплопроводность топлива (уменьшающаяся при выгорании и растрескивании топлива и зависящая от его температуры и плотности), снижение относительной плотности энерговыделения по радиусу топлива (возрастающее с выгоранием, что приводит к уменьшению температуры топлива).

Рост давления газа (рис. 4) обусловлен уменьшением свободного объема в твэле (в основном ввиду изменения зазора топливо—оболочка, где газ имеет более низкую температуру, чем в центральном отверстии или внутри образующихся трещин в топливе) и выходом газообразных продуктов деления и происходит даже при уменьшении средней линейной мощности твэла.

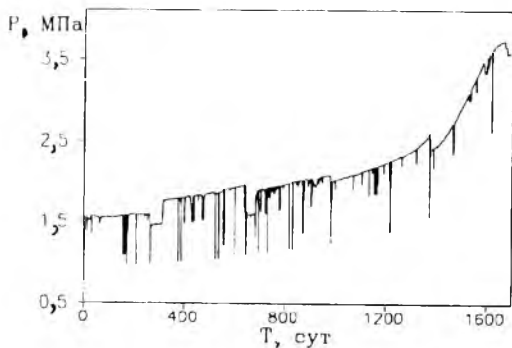
При интерпретации результатов расчета давления газа под оболочкой следует учитывать, что в твэлах для разных расчетных вариантов неодинаковые начальные свободные объемы под оболочкой, что обусловлено различием объемов газосборника, ис-



Р и с. 2. Зависимость средней линейной мощности q_l твэла второй ТВС от времени



Р и с. 3. Расчетная зависимость от времени максимальной температуры топлива твэла второй ТВС для варианта среднего зазора

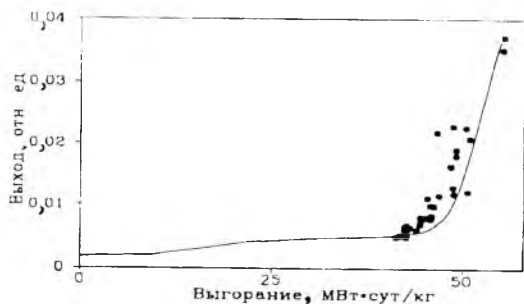


Р и с. 4. Расчетная зависимость от времени давления газа под оболочкой твэла второй ТВС для варианта среднего зазора

ходного зазора топливо—оболочка и диаметра центрального отверстия, и количество газа заполнения. Например, для рассматриваемого твэла варианта среднего эффективного зазора расчетное давление газа под оболочкой при нормальных условиях равно 1,58 МПа, при начальном давлении заполнения 0,7 МПа — 1,74 МПа, при начальном давлении 0,5 МПа и объеме газосборника 4,7 см³ — 1,34 МПа.

Основной вклад в уменьшение радиуса оболочки вносит ее ползучесть. При расчете принималось, что 70% потока быстрых нейтронов на оболочку твэла в рассматриваемом сечении пропорционально средней по ТВС линейной мощности твэлов, 30% — мощности твэла. До среднего по твэлу выгоранию ~ 45 МВт·сут/кг диаметр оболочки уменьшается, при этом его максимум находится примерно в середине высоты твэла. В результате ползучести оболочки и набухания топлива при выгорании в поперечном сечении 45—55 МВт·сут/кг зазор топливо—оболочка становится равным нулю. При более высоком выгорании в результате набухания топлива радиус оболочки начинает увеличиваться. Таким образом, расчетное остаточное уменьшение диаметра оболочки для твэлов выгоранием больше 45—50 МВт·сут/кг имеет по высоте два максимума (примерно 0,3—0,4 и 0,6—0,7 высоты активной зоны), среднее уменьшение диаметра оболочки будет меньше у твэлов с большим выгоранием.

Из анализа рис. 5 следует, что резкий рост выхода газообразных продуктов деления начинается при выгорании в поперечном сечении твэла больше 50—55 МВт·сут/кг, что соответствует выгоранию по твэлу более 45 МВт·сут/кг. Рост выхода можно объяснить перенасыщенностью матрицы продуктами деления и поверхностным эффектом. Этот рост во многом имеет атермальный характер и происходит даже при относительно низкой температуре топлива.



Р и с. 5. Расчетная зависимость выхода газообразных продуктов деления из топлива твэла второй ТВС для варианта среднего зазора и экспериментальная для 33 твэлов первой и второй ТВС от среднего по твэлу выгорания

ниже давления теплоносителя, давление газов под оболочкой при нормальных условиях в конце кампании не превышает 2 МПа, максимальная температура оболочки не выше 315 и 355 °С для наружной и внутренней поверхности соответственно.

Некоторые результаты послереакторного исследования. Приведем основные результаты послереакторного исследования твэлов рассматриваемых ТВС:

давление газовой среды под оболочкой при нормальных условиях для 15 и 18 твэлов первой и второй ТВС соответственно составляет 0,87—1,13 МПа со средним 0,95 МПа для твэлов первой и 0,95—1,4 МПа со средним 1,09 МПа для твэлов второй ТВС. Выход газообразных продуктов деления под оболочку составил 0,49—1,29% со средним 0,71% для твэлов первой и 0,69—3,71% со средним 1,66% для твэлов второй ТВС;

для двух твэлов второй ТВС выгоранием 48,1 и 49,9 МВт·сут/кг давление газовой среды под оболочкой при нормальных условиях составляло 1,36 и 1,84 МПа, выход газообразных продуктов деления — 6,21 и 5,37% соответственно;

диаметр центрального отверстия в таблетках топлива не изменился;

Результаты расчета показывают, что твэлы ВВЭР-440 при выгорании урана по твэлу до 57 МВт·сут/кг в рассматриваемом цикле по теплофизическим критериям полностью сохраняют работоспособность: температура топлива не более 1400 °С (~ 1500 °С с учетом возможной физической и геометрической неосесимметричности системы топливо—оболочка [6] или *r-z* отклонений [4] от модели коаксиальных цилиндров) и значительно ниже температуры плавления, выход газообразных продуктов деления не превышает 6%, максимальное давление газов под оболочкой не более 6 МПа и значительно

микроструктура топлива вблизи центрального отверстия не изменилась. Это свидетельствует о том, что роста зерен в процессе работы не было и максимальная температура топлива не превышала 1500 °С;

максимальное изменение плотности топлива (3,5% для твэлов первой и 4% для твэлов второй ТВС) наблюдалось в сечениях с максимальным выгоранием. При определении распухания топлива измеряли фрагменты таблеток массой несколько граммов. Локальное изменение плотности в области, близкой к наружной поверхности таблетки, было больше, что привело к зарастанию трещин в этой области. Именно поэтому при трактовке результатов табл. 3 необходимо учитывать, что по увеличению радиуса топлива нельзя напрямую определить расчетное уменьшение плотности топлива всей таблетки;

среднее уменьшение диаметра оболочки на участке активной зоны составляло 50—80 мкм со средним 70 мкм для твэлов первой и 40—80 мкм со средним 60 мкм для твэлов второй ТВС;

удлинение твэлов составляло 9,9—13,8 мм со средним 11,9 мм для твэлов первой и 7,5—14,8 мм со средним 11,3 мм для твэлов второй ТВС.

Сравнение расчета с послереакторными исследованиями показало хорошее соответствие.

Результаты послереакторных исследований состояния топлива, оболочек, чехлов показывают, что твэлы и ТВС сохранили работоспособность. Экспериментальные и расчетные исследования дают основание утверждать, что твэлы и ТВС ВВЭР-440 имеют запас работоспособности при среднем по ТВС выгорании до 50 МВт·сут/кг и могут эксплуатироваться до более глубокого выгорания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щеглов А.С., Проселков В.Н. Аннотация программы PIN- mod2. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1996, вып. 4.
2. Щеглов А.С., Сидоренко В.Д., Проселков В.Н. и др. Образование и развитие поверхностного слоя в топливном сердечнике ВВЭР-440. — Атомная энергия, 1996, т. 80, вып. 3, с. 221—223.
3. Novikov A.N., Pshenin V.V., Lizorkin M.P. et al. Code packade for WWER cores analysis and some aspects of fuel cycles improving. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1992, вып. 1, с. 3—9.
4. Щеглов А.С. Влияние зазора между таблетками топлива на температурное поле в твэле. — Атомная энергия, 1991, т. 71, вып. 2, с. 159—161.
5. Scheglov A.S., Proselkov V.N., Panin V.N. et al. Results of calculation of VVER-440 fuel rods (Kolskaya-3 NPP) at high burnup. — In: Proc. Inter. Sem. «VVER Reactors Fuel Performance, Modelling and Experimental Support». 7—11 Nov. 1994, St. Konstantine, Varna, Bulgaria, p. 131—136.
6. Щеглов А.С. Влияние эксцентриситета топлива и оболочки, овальности оболочки и скола таблетки топлива на температурное поле в твэле. — Атомная энергия, 1989, т. 67, вып. 3, с. 204—207.

Поступила 11.05.95

В окончательной редакции 23.11.95

УДК 621.039.66.012

ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВКАХ АТОМНЫХ ЛЕДОКОЛОВ И ПЛАВУЧИХ ЭНЕРГООБЛОКОВ

*Касперович А.И. (Обнинский филиал НИФХИ им. Л.Я. Карпова), Колесов Б.И.
(РНЦ «Курчатовский ин-т»), Сандлер Н.Г. (ОКБМ)*

Конструкционные особенности и опыт эксплуатации реакторных установок российских атомных судов и ледоколов описаны во многих статьях и монографиях, в частности, [1—4]. Однако некоторые аспекты проектирования и эксплуатации изве-