

03X17H14M3 (310 и 570 МПа соответственно) близки к данным для однослойных лент из Ni—6W, несмотря на то, что композитная лента только на 40% состоит из никель-вольфрамового сплава.

Намагниченность насыщения композитных лент составила $8 \text{ см}^3/\text{г}$ при 77 К, т.е. примерно в 2 раза ниже однослойных.

Выводы. Композиционные трехслойные ленты с двумя слоями из сплава Ni—6W характеризуются низким уровнем намагниченности, составляющим $8 \text{ см}^3/\text{г}$. Это вдвое меньше, чем у однослойных образцов Ni—6W, и такое же, как у однослойных лент с атомной долей вольфрама 7,5%. Механическая деформация композиционных лент относительно проста, ее режимы не отличаются от режимов для гомогенных лент из аналогичного сплава. Требуемая кубическая текстура может быть получена при текстурирующем отжиге при температуре не выше 1000°C и степени деформации более 94%.

Полученные данные в совокупности показывают, что разработанная композиционная лента-подложка и режим ее изготовления могут быть использованы для производства высокотемпературных сверхпроводниковых композитов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goyal A., Norton D., Budai J. e.a. High critical current density superconducting tapes by epitaxial deposition of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ thick films on biaxially textured metals. — Appl. Phys. Lett., 1996, v. 69, № 12, p. 1795—1797.
2. Specht E., Goyal A., Lee D. e.a. Cube-textured nickel substrates for high-temperature superconductors. — Supercond. Sci. Technol., 1998, № 11, p. 945—949.
3. Subramanya Sarma V., Eickemeyer J., Mickel C. On the cold rolling textures in some fcc Ni—W alloys. — Mat. Sci. Engng, 2004, v. 380, № 1—2, p. 30—33.
4. Ijaduolaa A., Thompsona J., Goyal A. e.a. Magnetism and ferromagnetic loss in Ni—W textured substrates for coated conductors. — Phys. C, 2004, v. 403, № 3, p. 163—171.
5. Pantisyrny V., Vorobieva A., Belotelova Yu. e.a. Development of the substrate material for coated conductor. — In: Proc. of ICMC-2012 Conf. Japan, Fukuoka, 2012, p. 895—898.
6. Vorobieva A., Abdyukhanov I., Rakov D. e.a. Development of paramagnetic tapes for coated conductors. — J. Phys. Conf. Ser., 2014, v. 507, № 2, p. 22—27.
7. Gaitzsch U., Hänisch J., Hühne R. e.a. Highly alloyed Ni—W substrates for low AC loss applications. — Supercond. Sci. Technol., 2013, № 26085024.
8. Nagaishi T., Shingai Y., Konishi M. e.a. Development of REBCO coated conductors on textured metallic substrates. — Phys. C, 2009, v. 469, p. 1311—1315.
9. Gao M., Suo H., Gao P. e.a. Stable cube texture in an advanced Ni alloy composite substrate prepared by powder metallurgic method. — J. Phys. Conf. Ser., 2010, v. 234, № 022010.
10. Gao M., Suo H., Zhao Y. e.a. Characterization and properties of an advanced composite substrate for YBCO-coated conductors. — Acta Mater., 2010, v. 58, № 4, p. 1299—1308.

УДК 621.039.546

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТВЭЛОВ ВВЭР

Новиков В.В., Кузнецов В.И., Салатов А.В.

Конкурентоспособность и необходимый уровень безопасности при эксплуатации ВВЭР требуют развития конструкций твэлов и ТВС.

Основным направлением совершенствования ядерного топлива для ВВЭР-440 является переход на кассеты РК и АРК с повышенным до 4,87% обогащением. С 2010 г. на четвертом энергоблоке Кольской АЭС внедряется топливный цикл на основе кассет второго поколения РК обогащением 4,87%, АРК — до 4,25% при работе реактора на повышенной до 107% тепловой мощности. Топливо второго поколения повышенного обогащения загружено в реактор совместно с эксплуатацией в течение 6—7 лет

опытных партий: 12 РК третьего поколения (РК-3), 6 ТВС кассет АРК второго поколения обогащением 4,87%. На АЭС с ВВЭР-1000 используются ТВСА-PLUS и ТВС-2М. Геометрическая стабильность ТВС нового поколения в активной зоне достигается за счет введения в ее конструкцию радиационно-стойкого каркаса из циркониевого сплава Э-635, обеспечивающего высокую жесткость топливной сборки.

Снижение ограничений на эксплуатационный ресурс с учетом повышения прочности и формоизменения ТВС позволяет внедрить длительный топливный цикл, технико-экономические характеристики которого зависят от загрузки

ки урана. Увеличение загрузки урана в ТВС является эффективным способом улучшения использования топлива на АЭС. Ураноемкость возрастает за счет увеличения диаметра топливных таблеток в ТВЭлах и уменьшения толщины оболочек или повышения высоты топливного столба.

В настоящее время при проектировании ТВЭлов ВВЭР предусматривается обеспечение работоспособности топлива с учетом тенденций развития ядерной энергетики — в ВВЭР-1000, -440 это увеличение коэффициента использования установленной мощности как результат внедрения длительного топливного цикла в сочетании с повышением мощности. Для ВВЭР-1000, работающего в таком режиме, мощность увеличивается до 104%, продолжительность топливной кампании составляет $3 \times 1,5$ с длительностью одного топливного цикла до 510 эф. сут [1]. Более эффективный топливный цикл ВВЭР-440 характеризуется увеличением мощности до 107%, топливной кампанией 6×1 с длительностью одного цикла не менее 315 эф. сут [2]. Направлением, определяющим проектирование ТВЭлов, являются разработка и сооружение реактора следующего поколения ВВЭР-1200.

Следует отметить, что условия эксплуатации ТВЭлов ВВЭР-440, -1000 с форсированной мощностью в длительных топливных циклах, как и ВВЭР-1200, характеризуются по сравнению со стандартным топливом ВВЭР их повышенными энерговыделением, температурой и паросодержанием теплоносителя. Помимо этого, давление теплоносителя в первом контуре ВВЭР-1200 предусматривается увеличить до 16,2 МПа по сравнению с 15,7 МПа в ВВЭР-1000.

Отмеченные тенденции в развитии ядерной энергетики ставят перед разработчиком ТВЭлов АО «ВНИИНМ» задачу, которую в общем виде можно сформулировать следующим образом: разработка конструкции ТВЭла увеличенной энергоемкости, которая обладала бы достаточными инженерными запасами в более напряженных по сравнению со стандартным топливом ВВЭР эксплуатационных условиях. Энергоемкость ТВЭла может быть обеспечена повышением обогащения и/или увеличением загрузки топлива. При этом конструкция ТВЭла должна удовлетворять требованиям безопаснос-

ти, предъявляемым к топливу надзорными органами России и стран, эксплуатирующих ВВЭР.

Термомеханический проект ТВЭла ВВЭР.

Методология технического проектирования основана на общих требованиях безопасности, предъявляемых к топливной системе реакторной установки. Основой термомеханического проекта ТВЭла является технический проект, который, помимо проектных расчетов и конструкторской документации, включает в себя:

методику обоснования работоспособности в режимах нормальной эксплуатации, нарушений нормальной эксплуатации и безопасного поведения ТВЭлов в проектных авариях (методика проектного обоснования);

экспериментальное обоснование проекта.

Термомеханический проект ТВЭлов ВВЭР предполагает разработку статистических методик проектных расчетов, реакторные и лабораторные эксперименты, которые направлены на определение предельных соотношений, связанных с проектными критериями, и валидацию проектных кодов. Конечной целью данного комплекса работ является снижение консервативности проектных расчетов, что соответствует современным тенденциям развития методик обоснования топлива водоохлаждаемых реакторов [3].

Методика проектного обоснования. До настоящего времени проектные расчеты выполнялись по консервативной методике. С ее использованием, в частности, были разработаны ТВЭлы с увеличенной загрузкой топливом ТВСА-12, ТВС-4 для ВВЭР-1000, РК-3 для ВВЭР-440, а также проекты ТВЭлов для ВВЭР-1200, ВВЭР-ТОИ. Расчеты показали, что по некоторым проектным критериям ресурс ТВЭла почти исчерпан.

Но расчеты по консервативной методике могут приводить к необоснованно высоким оценкам критериальных параметров ТВЭлов, по которым проверяется их работоспособность в условиях нормальной эксплуатации, нарушений нормальной эксплуатации и безопасное поведение в условиях проектной аварии. Это связано с необходимостью назначения проектных коэффициентов запаса по каждому критерию на основе предшествующего опыта проектного обоснования. Трудности возникают при обосновании проектных коэффициентов запаса ТВЭлов новых конструкций с увеличенной энергоемкостью,

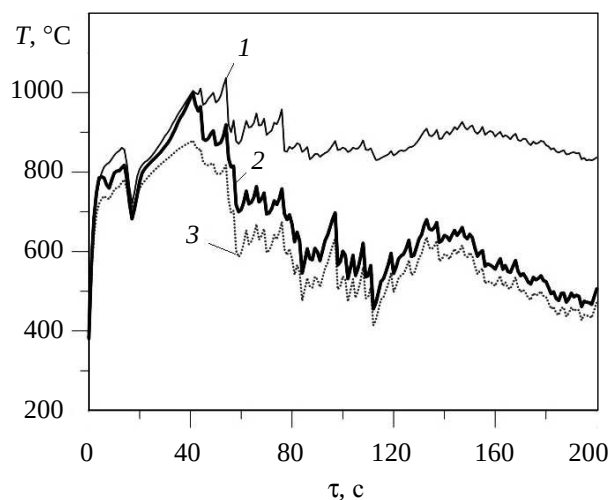
при изменении проектных критериев, например, при переходе к критерию превышения внутреннего давления газа над внешним давлением теплоносителя в условиях нормальной эксплуатации или использовании индивидуальных комбинаций наихудших значений всех параметров твэла для проверки выполнения каждого проектного критерия.

Избыточность консерватизма при проектировании новых твэлов может быть снижена за счет применения статистических методик расчетного обоснования [3, 4]. Статистическая методика следует процедурам, в соответствии с которыми на базе анализа таблиц ключевых явлений определены значимые параметры топлива и характеристики их неопределенностей [5]. Рассматриваются неопределенности трех типов входных ключевых параметров твэла, влияющих на его термомеханическое поведение при нормальной эксплуатации и проектных авариях: конструкционные и технологические параметры твэла, расчетные модели кодов СТАРТ-3А, РАПТА-5.2 [6, 7], параметры эксплуатации до начала аварии.

Для статистической комбинации индивидуальных неопределенностей входных ключевых параметров используется метод непараметрической порядковой статистики GRS [8, 9]. Пространство неопределенности входных ключевых параметров генерируется случайным образом методом Монте-Карло. Число расчетов определяется по формуле Уилкса из требования к оценке границ интервалов для выходных критерияльных параметров [10].

Использование статистической методики позволяет увеличить запасы максимальных критериальных параметров до их пределов, а также получить количественные оценки критериальных параметров, например, максимальной температуры оболочки в аварии (рис. 1).

Экспериментальное обоснование проекта. Оно включает в себя как экспериментальное определение предельных величин, связанных с проектными критериями, так и валидацию проектных кодов. В АО «ВНИИИМ» для проектных расчетов характеристик твэлов ВВЭР используются коды СТАРТ-3А и РАПТА-5.2, а также ANSYS [11]. АО «ВНИИИМ» в кооперации с отечественными и зарубежными организациями участвует в программе вне- и внутриреакторных



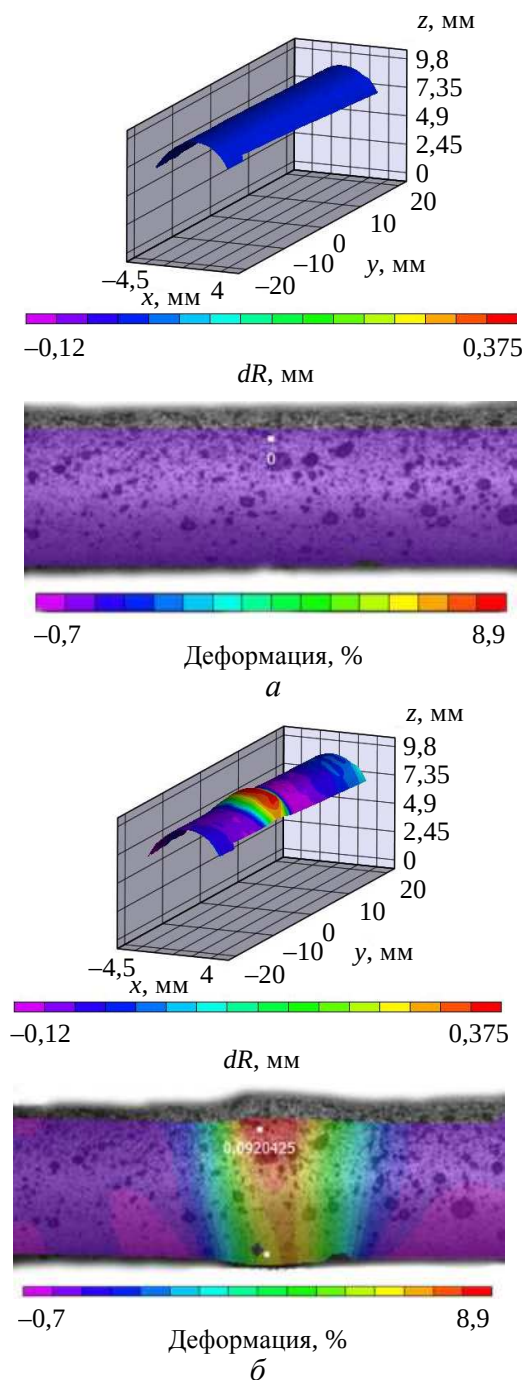
Р и с. 1. Максимальная (1), средняя (2), минимальная температура (3) оболочки при аварии с потерей теплоносителя PWR по результатам 93 расчетов

экспериментов для обеспечения расчетных исследований.

Механические испытания на установке, моделирующей взаимодействие топлива и оболочки. Одной из важных проблем обоснования прочности твэлов является учет локальных эффектов нагружения оболочки, вызванных, в частности, особенностями взаимодействия таблеток с оболочкой при увеличении мощности реактора. При этом таблетки фрагментируются. Учесть в расчетах такое сложное нагружение можно с помощью кодов, разработанных на основе метода конечных элементов, таких, как ANSYS.

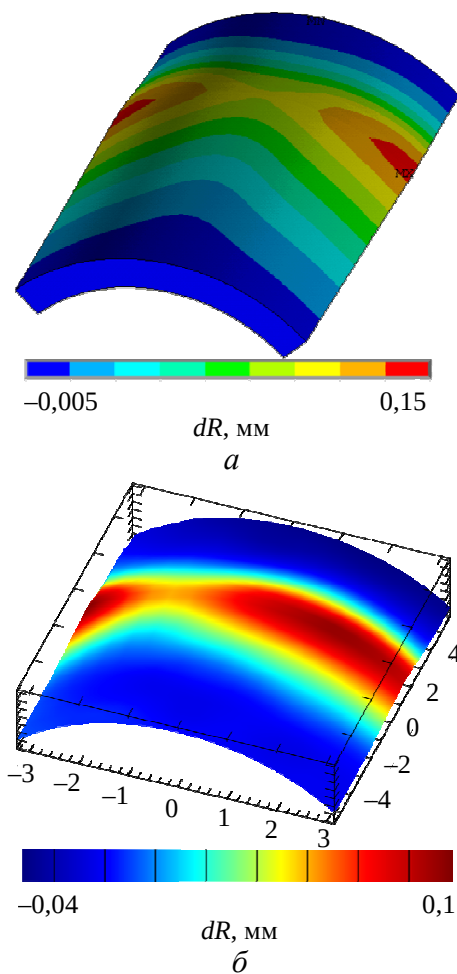
Корректность разработанной в среде ANSYS модели должна быть подтверждена валидационными расчетами. Для этой цели в АО «ВНИИИМ» разработана моделирующая взаимодействие топлива с оболочкой установка, которая обеспечивает фрагментацию керамического вкладыша, имитирующего топливную таблетку, и регистрацию, помимо нагрузочной кривой, полей перемещений оболочки при деформировании [12]. По результатам испытаний оболочек была выполнена валидация модели, разработанной в среде кода ANSYS (рис. 2, 3).

Кинетика окисления и остаточная пластичность сплава Э-110 на губчатой основе. Охрупчивание оболочки твэла в условиях аварий с потерей теплоносителя ограничивает максимальную температуру оболочки $\leq 1200^\circ\text{C}$ и эквивалентную степень окисления $\leq 18\%$. Критерий охрупчивания оболочки на основе циркониевой губки обоснован в соответствии с совре-



Р и с. 2. Профиль измеряемого образца в начале (а) и конце (б) механических испытаний оболочек на установке моделирования взаимодействия с топливом с видеоэкстензометром Vic3D

менными требованиями к оценке состояния оболочек твэлов [13]. Экспериментальные исследования показали, что кинетика окисления оболочек из сплава Э-110 на основе циркониевой губки имеет параболическую зависимость от времени и переход к линейному окислению не наблюдается при времени выдержки не менее 5000 с. Окисленные оболочки сохраняют оста-

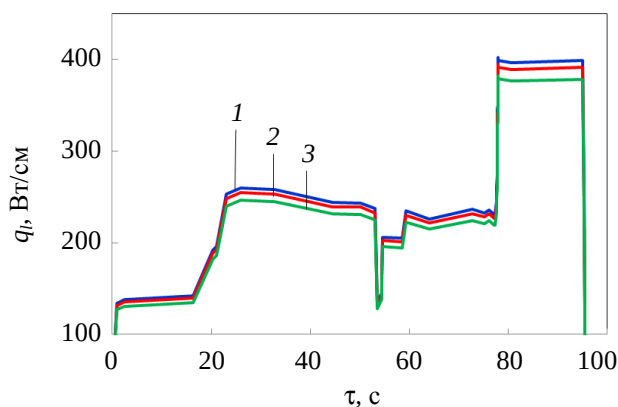


Р и с. 3. Расчетное (а) и экспериментальное радиальное перемещение (б) в трубчатом образце (перемещение плунжера 2 мм)

точную пластичность при степени окисления до 18%.

Реакторные испытания твэлов ВВЭР с высоким выгоранием и увеличенной нагрузкой. Необходимым элементом экспериментального обоснования работоспособности и безопасности топлива ВВЭР в условиях рассматриваемых проектных режимов нормальной эксплуатации и проектных аварий являются реакторные эксперименты с рефабрированными твэлами ВВЭР, которые изготовлены из полномасштабных твэлов, эксплуатировавшихся на энергоблоках ВВЭР-1000.

Испытания твэлов ВВЭР-1000 ТВСА-АЛЬФА № ИД01077 в режиме скачкообразного изменения мощности NG1. В 2012 г. в реакторе МИР АО «ГНЦ НИИАР» были испытаны в этом режиме три полномасштабных твэла с увеличенной нагрузкой топлива. Они были



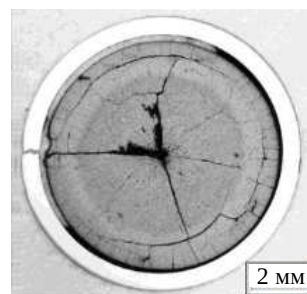
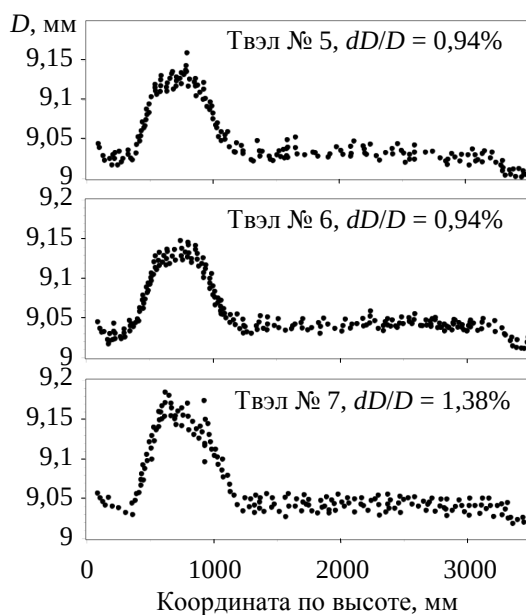
Р и с. 4. Изменение максимальной линейной мощности твэла № 7 (1), 6 (2), 5 (3) в зависимости от времени в эксперименте NG1

извлечены из ТВСА-АЛЬФА № ИД01077, эксплуатировавшейся в течение трех топливных циклов на первом блоке Калининской АЭС. Их среднее выгорание составляло $\sim 43,5$ МВт·сут/кг (рис. 4).

Эксперимент планировался таким образом, чтобы максимальная линейная мощность и ее приращение превышали допустимое на уровне выгорания $43,5$ МВт·сут/кг. В эксперименте твэл № 7 с максимальной мощностью 400 Вт/см разгерметизировался. Послереакторные исследования показали, что максимальная остаточная деформация негерметичного твэла № 7 превышает 1% , деформация герметичных равна $0,94\%$ (рис. 5).

Таким образом, эксперимент NG1 показал, что конструкция твэла с увеличенной загрузкой топлива ТВСА-АЛЬФА обладает высоким запасом по линейной нагрузке при выгорании $43,5$ МВт·сут/кг.

Испытания рефабрикованных твэлов ВВЭР в реакторных экспериментах с потерей теплоносителя. Анализ экспериментов по оценке воздействия режимов с потерей теплоносителя на состояние оболочек и топлива с разным выгоранием, выполненных в 2001—



Р и с. 5. Изменение диаметра оболочки твэла № 5, 6, 7 в эксперименте NG1 и поперечный шлиф твэла № 7 в месте повреждения оболочки

2014 гг., показал, что их термомеханическое состояние в четырех первых экспериментах является безопасным — окисление оболочки на низком уровне, сохраняющем остаточную пластичность, фрагментация топлива на крупные частицы, малое осевое перемещение фрагментов таблеток, отсутствие диспергирования фрагментов топлива в теплоноситель (см. таблицу). Эксперимент МИР-LOCA/72 имел целью исследование фрагментации, осевой релокации и диспергирования топлива высокого выгорания с учетом влияния дистанционирующих решеток

Реакторные эксперименты с потерей теплоносителя

Эксперимент	Реактор	Исходные твэлы	Выгорание топлива, МВт·сут/кг
МИР-LOCA/50	МИР (НИИАР)	ВВЭР-1000, Запорожская АЭС (Украина)	47,2, 49, 45,8
IFA-650.6	НВWR (Халден)	ВВЭР-440, АЭС «Ловиса» (Финляндия)	55,5
IFA-650.11	»	»	55,5
МИР-LOCA/60	МИР (НИИАР)	ВВЭР-1000, Балаковская АЭС	58,1, 58,1, 58,6
МИР-LOCA/72	»	ВВЭР-1000, Калининская АЭС	76

для разработки расчетных моделей данных явлений [14]. Поэтому в эксперименте был реализован консервативный температурный режим испытания по сравнению с условиями проектных аварий с потерей теплоносителя для твэлов ВВЭР высокого выгорания.

Практика расчетного обоснования безопасности ВВЭР-440 показывает, что в проектных авариях с потерей теплоносителя твэлы сохраняют целостность. В ВВЭР-1000 и -1200 возможна разгерметизация наиболее теплонапряженных твэлов при максимальной температуре оболочек не ниже 800 °С (см. таблицу, рис. 6). Мощность твэлов выгоранием более 50 МВт·сут/кг не выше средней, максимальная температура оболочек таких твэлов в проектных авариях не превышает 700 °С, разгерметизации не происходит. Эксперимент МИР-ЛОСА/60, в котором рефабрикованные твэлы сохранили

герметичность при температуре оболочки 700—800 °С, подтверждает расчетное обоснование.

Испытания рефабрикованных твэлов ВВЭР в реакторных экспериментах с возрастанием реактивности. Обоснование критерия отсутствия фрагментации твэлов ВВЭР в авариях с возрастанием реактивности базируется на испытаниях рефабрикованных твэлов выгоранием 50 и 60 МВт·сут/кг в импульсных реакторах ИГР и БИГР [14, 15]. В 2010—2014 гг. проведены новые испытания на реакторе БИГР рефабрикованных твэлов ВВЭР-1000 с увеличенной загрузкой топлива и высоким выгоранием. Были испытаны твэлы с топливом выгоранием 39 и 75 МВт·сут/кг без центрального и с центральным отверстием соответственно. Во всех экспериментах фрагментация твэлов и плавление топлива не наблюдались. На основе испытаний твэлов ВВЭР выгоранием 39, 50, 60, 75 МВт·сут/кг в импульсных реакторах ИГР и БИГР построен консервативный критерий отсутствия фрагментации твэлов в проектных авариях с возрастанием реактивности для использования в проектном обосновании твэлов ВВЭР.

Заключение. Современное состояние проектирования твэлов ВВЭР характеризуется следующими основными аспектами:

- разработана система проектных критериев для обоснования работоспособности и безопасности твэлов в режимах нормальной эксплуатации, нарушений нормальной эксплуатации и проектных авариях;

- проектные критерии обоснованы на базе реакторных и лабораторных экспериментов;

- проектные критерии работоспособности и безопасности твэлов ВВЭР в режимах нормальной эксплуатации, нарушений нормальной эксплуатации и проектных авариях обосновываются с помощью консервативной и статистической методики с использованием термомеханических кодов СТАРТ-3А и РАПТА-5.2, разработанных в АО «ВНИИНМ». Коды валидированы на базе вне реакторных и реакторных экспериментов и аттестованы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Семченков Ю., Павловичев А., Чибиняев А. Близость к сценарию. Перспективы эволюционного развития топлива ВВЭР. — Бюл. Росэнергоатома, 2001, № 10, с. 24—29.

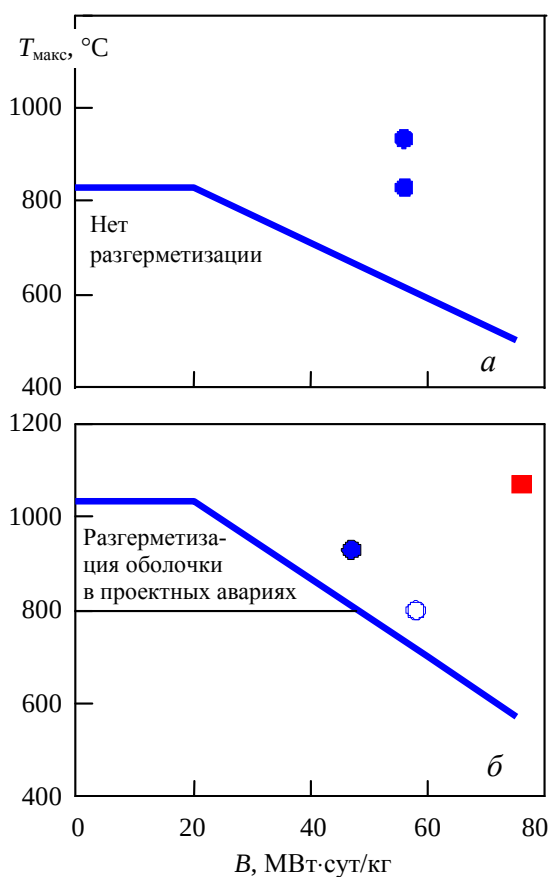


Рис. 6. Верхняя граница максимальной температуры оболочки в проектных расчетах аварии с потерей теплоносителя ВВЭР-440 (а) и ВВЭР-1000 (б) в зависимости от выгорания в сравнении с результатами экспериментов в реакторе НВВР (Халден) (а) и МИР (б): ○ — оболочка не разгерметизировалась; ●, ■ — разгерметизация оболочки без диспергирования и с диспергированием топлива соответственно

2. Гагаринский А.А., Соловьева Е.Г. Анализ возможности создания полного 6-годичного топливного цикла для реактора ВВЭР-440 при условии работы на повышенном уровне тепловой мощности. — В сб.: Межд. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». 28—31 мая 2013 г., Подольск, ОКБ «Гидропресс», ID KMS 2013-013.
3. **Implications** of Power Uprates on Safety Margins of Nuclear Power Plants. IAEA-TECDOC-1418. Vienna: IAEA, 2004.
4. Салатов А.В., Гончаров А.А., Еременко А.С. и др. Развитие методологии анализа поведения топлива легководных реакторов в проектных авариях. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2013, вып. 1(74), с. 4—16.
5. **Boyack B. e.a.** Phenomenon Identification and Ranking Tables (PIRTs) for Loss-of-Coolant Accidents in Pressurized and Boiling Water Reactors Containing High Burnup Fuel. NUREG/CR-6744, LA-UR-00-5079, 2001.
6. Программное средство СТАРТ-3А. М., НТЦ ЯРБ Ростехнадзора, 2013.
7. Программное средство РАПТА-5.2. М., НТЦ ЯРБ Ростехнадзора, 2011.
8. **Best Estimate Safety Analysis for Nuclear Power Plants: Uncertainty Evaluation.** Saf. Rep. Ser. № 52. Vienna: IAEA, 2008.
9. **Pal L., Makai M.** Remarks on Statistical Aspects of Safety Analysis of Complex Systems. KFKI Atomic Energy Research Institute, 2002. 61 p.
10. **Уилкс С.** Математическая статистика. М.: Наука, 1967. 632 с.
11. **ANSYS, Inc.** Products, 14.0 Release, 2011.
12. **Krupkin A.V., Kuznetsov V.I., Novikov V.V., Sergienko I.R.** Mandrel test simulation using ANSYS software. — In: ICAPP, USA, 6—9 April, 2014, Pap. 14400.
13. **Performance-Based** Emergency Core Cooling Systems (ECCS) Cladding Acceptance Criteria. NRC-2008-0332, NRC-2012-0041, NRC-2012-0042, NRC-2012-0043.
14. **Yegorova L. e.a.** Data Base on the Behaviour of High Burnup Fuel Rods with Zr—1%Nb Cladding and UO₂ Fuel (VVER Type) under Reactivity Accident Conditions. NUREG/IA-0156, 1999, vol. 1—3.
15. **Yegorova L. e.a.** Experimental Study of Narrow Pulse Effects on the Behaviour of High Burnup Fuel Rods with Zr—1%Nb Cladding and UO₂ Fuel (VVER Type) under Reactivity-Initiated Accident Conditions. NUREG/IA-0213, 2006, vol. 1, 2.

УДК 621.039.73

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И АППАРАТУРНЫЕ РЕШЕНИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ТЕПЛОВЫХ РЕАКТОРОВ

*Волк В.И., Веселов С.Н., Двоеглазов К.Н., Арсеенков Л.В. (АО «ВНИИНМ им. А.А. Бочвара», г. Москва),
Гаврилов П.М., Смирнов С.И. (Горно-химический комбинат, г. Железнодорожск, Красноярский край),
Алексеев В.Н. (КФ АО ФЦЯРБ, г. Железнодорожск, Красноярский край)*

Принципиальная схема гидрометаллургической переработки отработавшего ядерного топлива включает фрагментацию пучка ТВЭЛов, волоксидацию, растворение отработавшего топлива, осветление отделенной от фрагментов оболочек малоконцентрированной суспензии и гидрометаллургическую (экстракционную) переработку осветленного раствора. Волоксидация предусматривает термическую обработку отработавшего топлива при 300—500 °С в воздушной или обогащенной кислородом среде. При такой переработке удаляется не менее 99% трития, однако остаточное содержание не позволяет проводить дальнейшую переработку без контроля миграции, улавливания и изоляции трития.

В качестве альтернативного разработан двухстадийный без перемещения материала процесс [1], включающий окислительную обработку отработавшего топлива на первой стадии смесью воздуха и диоксида углерода при 450—600 °С и

паровоздушной смесью (содержание паров воды соответствует точке росы при 40 °С) при 350—400 °С. На первой стадии удаляется тритий из тритийсодержащих гидроксидов щелочных и щелочно-земельных металлов MeOT и Me(OT)₂ по реакциям типа $2\text{MeOT} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Me}_2\text{CO}_3 + \text{T}_2\text{O}$, на второй стадии удаляются остатки трития по реакциям изотопного обмена.

Традиционная экстракционная переработка отработавшего топлива включает в качестве головной операции противоточное извлечение экстрагируемых и соэкстрагируемых элементов из потока питания.

Разработанная схема головной операции, показанная на рис. 1, предусматривает обработку потока питания последовательно в две стадии двумя потоками обратного экстрагента [2]. На первой стадии в режиме предельного (~100%) насыщения органического потока извлекается 75—80% поступающей с потоком питания суммы урана и плутония. На второй стадии в режи-