

- в) в сварном шве в обеих фазах отсутствуют растягивающие зональные напряжения;
- г) в ЗТВ растягивающие зональные напряжения в α -Fe составляют: для наружной поверхности порядка 75 МПа; для внутренней поверхности порядка 300 МПа.

По результатам проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. Концентрационная неоднородность поверхностей будет приводить к развитию явлений термической усталости и коррозии по длине трубы.
2. Материал сварного шва не будет подвержен разрушению за счёт термической усталости в связи с наличием в нём сжимающих напряжений.
3. Развитие разрушений наиболее вероятно с внутренней поверхности трубы в ЗТВ на расстоянии 14,5 мм от оси сварного шва (в трубе из стали марки 12Х18Н9Т).
4. Рентгенодиагностика может быть достаточно эффективным средством для прогностических оценок работоспособности сварного шва.

Список литературы:

1. Герасимов В.В., Переверзева О.В. Разрушение сварных соединений элементов теплоэнергоустановок // Технология металлов. – 2008. – № 8. – С. 26–30.
 2. Корнеев А.Е., Старченко Е.Г., Пронин В.П. Определение количества остаточного аустенита в сварных соединениях // Технология металлов. – 2008. – № 5. – С. 24–27.
 3. Масленков С.Б., Масленкова Е.А. Стали и сплавы для высоких температур: Справ. изд. В 2-х кн. Кн. 1. – М.: Металлургия, 1991. – 383 с.
- Работа поддержана грантом РФФИ № 15-08-99544а.

Эволюция макроячейки отечественных водо-водяных энергетических реакторов

Виноградов М.П., Аристов Е.В., Кузьмин А.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

E-mail: kuzminav@tpu.ru

В физических расчетах гетерогенных ядерных реакторов первого поколения конструктивное решение активной зоны позволяло четко выделить элементарную ячейку решетки с равенством разносторонних токов нейтронов на её границах. Замена реальной ячейки цилиндрической ячейкой равного объема и четким выделением зон горючего и замедлителя позволяла заметно упростить математические выкладки [1]. Эта эквивалентная ячейка, известная как ячейка Зейца-Вигнера, по-прежнему рассматривается в современной учебной литературе [2]. Совершенствование ядерных реакторов и связанное с этим усложнение структуры активной зоны как бы отодвигает в тень этот изящный прием приближенного расчета ядерного реактора.

Под *макроячейкой* или *ячейкой периодичности* будем понимать повторяющийся по своему составу элемент активной зоны. Трансформация макроячеек гетерогенного реактора связана в первую очередь с целью повышения экономичности и безопасности использования ядерного топлива. Покажем это на примере становления отечественных реакторов – ВВЭР-440 и ВВЭР-1000.

На реакторе ВВЭР-3, одном из экспериментальных предшественников ВВЭР-440, решалась задача выравнивания поля энерговыделения по активной зоне с помощью тепловыделяющих сборок (ТВС) разного обогащения и стержней регулирования [3,4]. В этом случае ячейка периодичности представляла собой 120-градусный сектор (рис.1).

Активная зона ВВЭР-440 набрана из шестигранных чехловых ТВС. В качестве компенсации начальной избыточной реактивности используется жидкостное борное регулирование и 37 подвижных поглощающих сборок типа нейтронных ловушек. С начала эксплуатации в 1973 году при проведении работ по совершенствованию топливного цикла, режимов перегрузок топлива и компоновки активной зоны менялся сектор ячейки периодичности [5]. Так, например, при анализе возможного использования рабочих кассет с регенератором урана обогащением 2,4%, картограмма загрузки представляла сектор в 60°, но в большинстве случаев анализа других вариантов топливоиспользования рассматривались ячейки периодичности в 30°.

Первая топливная загрузка, согласно проекту ВВЭР-440, формировалась из кассет различного обогащения для выравнивания поля энерговыделения (

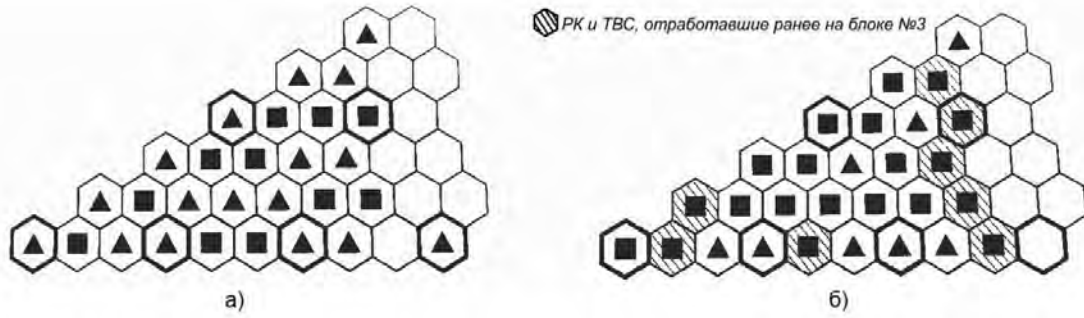


Рис. 4а). При этом значительное количество кассет с пониженным обогащением использовалось в течение одного-двух лет эксплуатации. Энергоемкость проектной первой загрузки превышала 300 эфф. сут. Для уменьшения энергоемкости первой топливной загрузки и повышения эффективности использования топлива свежие кассеты с низким обогащением заменялись выгоревшими кассетами, отработавшими в составе загрузки другого энергоблока. Данный способ был применен при формировании первой топливной загрузки 4-го блока Кольской АЭС (Ошибка! Источник ссылки не найден.).

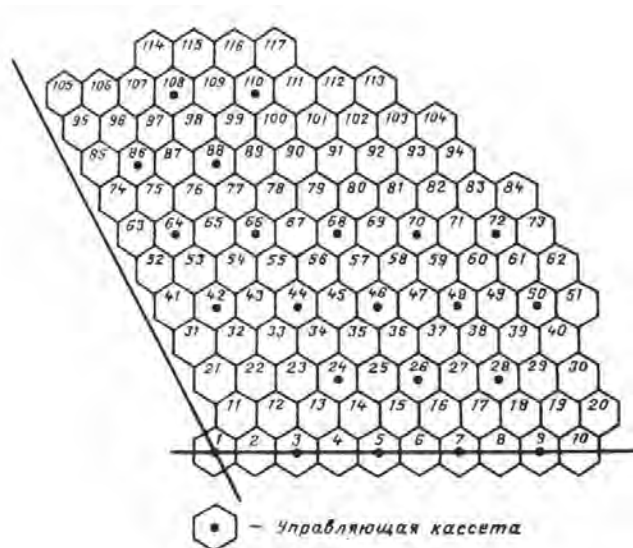


Рис. 3. Ячейка периодичности топливной загрузки реактора ВВЭР-3

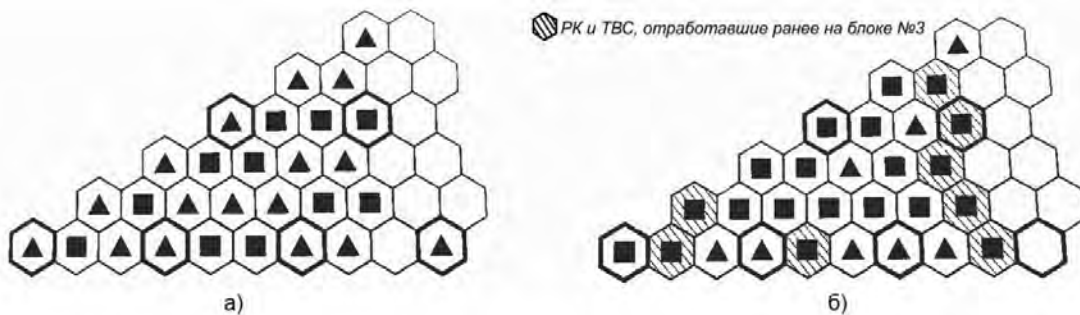


Рис. 4. Картограмма первой топливной загрузки Кольской АЭС а) блока 3 (проектная), б) блока 4: квадрат - обогащение 1,6%; треугольник — обогащение 2,4%, без знака - обогащение 3,6% [5]

Макроячейки ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 имеют одинаковый сектор и этому есть свои объяснения (рис.3-5). Активные зоны реакторов набраны из тепловыделяющих сборок ТВС-2М с удлиненным топливным столбом, прошедших эксплуатационную аттестацию на реакторах ВВЭР-1000.

В этих реакторах в отличие от проекта ВВЭР-440 используются принципиально другие органы систем управления и защиты (СУЗ). Вместо подвижных поглощающих сборок здесь применено кластерное регулирование. Кластеры относятся к «легким» органам СУЗ и сравнительно слабо искажают поле энерговыделения. В проекте ВВЭР-1200 предусмотрено увеличение количества органов регулирования СУЗ до 121 шт., по сравнению с ВВЭР-1000. Также стоит отметить, что в ТВС для ВВЭР-1200 используются утяжелённые поглощающие элементы СУЗ с увеличенной длиной для перекрытия удлинённого топливного столба (Рис.).

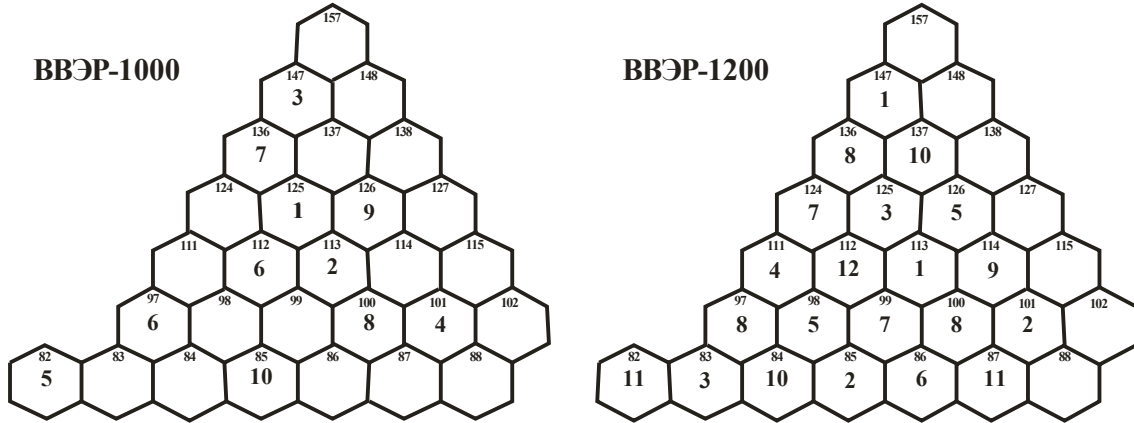


Рис. 4. Распределение ОР СУЗ в активных зонах ВВЭР-1000 [7]

Увеличение загрузки топлива и его обогащения потребовало использовать выгорающие поглотители в дополнение к имеющимся способам компенсации избыточной реактивности

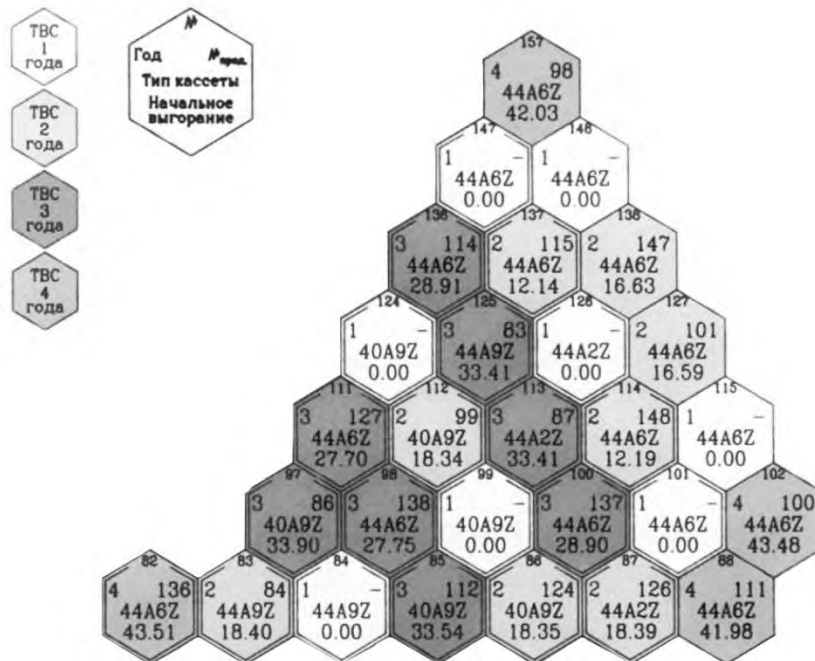


Рис. 5. Ячейка периодичности первой топливной загрузки ВВЭР-1200 [8]

Осуществлен переход к новой концепции использования топлива, основанной на применении четырех – пятигодичных топливных циклов с одной перегрузкой в 12 (18) месяцев при максимальном выгорании топлива в ТВС до 70 МВт·сут/кг U. Кроме того, оборудование РУ и активная зона реактора должны также обеспечивать возможность работы с межперегрузочным периодом до 24 месяцев.

При переходе от одного поколения реакторов ВВЭР к другому наблюдается переход ко все более глубокому выгоранию топлива, что приводит к увеличению экономичности использования горючего и снижению топливной составляющей стоимости 1 кВт·ч. Средние величины глубины выгорания для последовательных вариантов (кроме ВВЭР-365) соответственно составляют 13; 28,6; 40 и 70 МВт сут/кг U. Углубление выгорания связано с ростом обогащения топлива, которым подпитывается реактор, с 2 до 5%.

Совершенствование топливного цикла, включая режимы перегрузок топлива, компоновки активной зоны и конструкции ТВС требует современных расчетных средств оптимизации [5,9]. Трехмерные расчеты позволяют получить детальную информацию о запасах реактивности зоны, характеристиках и положения органов СУЗ, критической концентрации бора. Кроме того, по данным расчета на определенный момент кампании воссоздается трехмерное поле энерговыделения с оценкой коэффициентов неравномерности по радиусу и высоте и средней глубины выгорания каждой ТВС. Оцениваются переходные процессы на ксеноне и самарии. Результаты расчетов на текущую микрокампанию оформляются в виде альбома нейтронно-физических характеристик для персонала реакторной установки.

Такая детализация расчетов, конечно же, непосильна «ручному» счету, но в получении первых интегральных оценок характеристик реактора использование эквивалентной ячейки дает обнадеживающие результаты.

Список литературы:

1. Вейнберг А., Вигнер Е. Физическая теория ядерных реакторов: Пер. с англ. / Под ред. Я.В. Шевелева. – М.: Изд-во иностр. лит., 1961. – 732 с., ил.
2. Основы теории и методы расчёта ядерных энергетических реакторов: Учеб. пособие для вузов / Г.Г. Бартоломей, Г.А. Бать, В.Д. Байбаков, М.С. Алхутов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 512 с., ил.
3. Тепловыделение в ядерном реакторе / Е.С. Глушков, В.Е. Демин, Н.Н. Пономарев-Степной, А.А. Хрулев; Под ред. Н.Н. Пономарева-Степного. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 160 с., ил.
4. Пономарев-Степной Н.Н., Глушков Е.С. Профилирование ядерного реактора. М.: Энергоатомиздат, 1988. – 240 с., ил.
5. Повышение эффективности топливоиспользования и совершенствование систем обращения с ядерным топливом на АЭС с ВВЭР-440 / Ю.В. Коломцев, В.В. Омельчук, Ю.Н. Пыткин, С.А. Андрушечко. – СПб., 2000. – 232 с.: ил.
6. Ташлыков О.Л., Кузнецов А.Г., Арефьев О.Н. Эксплуатация и ремонт ядерных производящих установок АЭС: Учебник для техникумов, в 2кн. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 256 с., ил.
7. Физика и эксплуатационные режимы реактора ВВЭР-1000 / В.И. Белозеров, М.М. Жук, Ю.А. Кузина, М.Ю. Терновых. – Монография. М.: НИЯУ МИФИ, 2014. – 288 с.
8. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта / С.А. Андрушечко, А.М. Афров, Б.Ю. Васильев, В.Н. и др. – М.: Логос, 2010. – 604 с.
9. Байбаков В.Д., Воробьев Ю.Б., Кузнецов В.Д. Коды для расчета ядерных реакторов: Учебное пособие. – М.: Издательство МЭИ, 2003. 163 с., ил.

Международные и национальные требования к системе менеджмента качества в атомной энергетике.

Виноградова Г.С.

*БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Россия, г. Санкт-Петербург
E-mail vinogradovag@mail.ru*

В статье [1] подробно рассматривается вопрос важности внедрения и управления системой менеджмента качества (СМК) для эффективной работы организации атомной отрасли. Приводится сравнительный анализ требований IAEA GS-R-3[2] и ISO 9001:2008 [3]. Так же дается информация об особенностях создания, внедрения и управления системой менеджмента качества (ISO 9001) или системой управления (IAEA GS-R-3) на объектах использования атомной энергии (ОИАЭ) и в организациях, производящих продукцию и оказывающих услуги для ОИАЭ.

Хочется еще раз подчеркнуть тот факт, что МАГАТЭ поощряет создание национальных норм по системам управления для ОИАЭ в атомной энергетике. Еще в 2000-х годах МАГАТЭ пришло к выводу о необходимости дополнения требований ISO 9001 для применения при создании эффективных систем управления в атомной энергетике.