**Некоторые аспекты оптимизации параметров ядерного топлива для ВВЭР**

Лунин Г.Л., Духовенский А.С., Горохов В.Ф.,

Доронин А.С., Алексеев П.Н., Прошкин А.А.

Российский Научный Центр Курчатовский институт

В подавляющем большинстве энергетических реакторов ядерное топливо используется в виде законченных в конструктивном отношении единичных узлов, имеющих строгую геометрию и состав материалов (ТВС) и поступающих на АЭС от заводов-изготовителей. Активная зона формируется для каждого топливного цикла на основании схемы размещения ТВС, выбранный по результатам вариантных нейтронно-физических расчетов. В отечественной практике такие схемы размещения ТВС в конкретном виде разрабатываются соответствующим персоналом АЭС с учетом различных факторов, в том числе установленных нормативных требований и рекомендаций по основным характеристикам активной зоны после очередной перегрузки топлива. С учетом установившегося порядка в топливообеспечении реакторов можно выделить, следовательно, два направления в оптимизации показателей использования топлива, а именно:

совершенствование топливных циклов с применением отработанных ТВС и обоснованных характеристик их работоспособности и

поиск резервов , выявление излишних запасов в конструкционном оформлении топлива и внесение изменений в геометрию решетки и состав используемых материалов; после получения успешных результатов в этом направлении могут возобновляться работы по совершенствованию в первом направлении.

Выход на мировой рынок ядерного топлива требует от отечественных поставщиков определенных усилий в обоих направлениях. Анализ складывающейся ситуации показывает, что для успешной конкуренции необходимо, помимо проводимых работ по первому направлению , обратить серьезное внимание и интенсифицировать работы второго направления. При этом возникает ряд специфических задач, содержание и возможные пути решения которых кратко изложены в данном докладе.

Исходной целью использования ядерного топлива является получение тепловой энергии. Накопленный опыт в проектировании и эксплуатации ТВС указывает на то, что экономичность работы реакторов типа ВВЭР достигается при достаточно высоких тепловых нагрузках топлива. При этом, однако, должны надежно обеспечиваться определенные запасы до некоторых предельных величин с тем, чтобы работа реактора была стабильной и безопасной, особенно в случаях отказа оборудования, т.е. в режимах с нарушением нормальных условий эксплуатации и при постулируемых проектных авариях. Определенный компромисс между стремлением к повышению отводимой тепловой энергии и обеспечением соответствующих запасов достигается и фиксируется в проекте твэл, ТВС и реакторной установки. Основой для компромиссных решений являются, в частности, нормативные документы. По мере накопления опыта успешной эксплуатации ТВС, изготавливаемых на проектной основе, естественно, возникает намерение увеличить энерговыработку топлива. В принципе такое увеличение может быть реально, если не будут нарушены проектные основы и соответствующие нормативные критерии. Для достижения поставленной цели необходим правильный выбор вносимых изменений и проведено достаточное обоснование предлагаемых технических решений. В конечном счете, работы по совершенствованию ТВС должны включать объемный комплекс многоплановых исследований, поскольку в силу специфики ядерного топлива затрагиваются весьма различные и важные аспекты решения указанной проблемы [1].

Количественной характеристикой, выражающей топливную энергию, отведенную от единицы массы выгружаемого топлива, является, как известно, средняя глубина выгорания - [МВтхэфф.сут/кг].

Исходя из указанной размерности данной характеристики, видно, что стремление к увеличению отводимой тепловой энергии может реализовываться либо повышением удельной весовой мощности [МВт/кг], либо продлением пребывания топлива в активной зоне при сохранении номинальной мощности реактора [эфф.суток/кг], т.е. без ее изменения. Может анализироваться увеличение и обоих указанных параметров. Но в любом случае необходимо проведение исследований для проверки приемлемости принимаемых изменений относительно всего комплекса проектных основ и нормативных величин.

Следует отметить, что при совершенствовании единичных конструкционных узлов ядерного топлива (ТВС), поставляемых для работы реактора на АЭС, вносимые изменения, как правило, малы, и ожидаемые положительные эффекты также незначительны с технической точки зрения. Поэтому при проведении соответствующих исследований приходится иметь дело с достаточно тонкими эффектами влияния предполагаемых изменений на проверенные практикой характеристики, параметры и материалы. Это требует использования достаточно точных и надежных средств для анализа и представительных результатов для обоснования намеченных мероприятий по изменениям, поскольку некоторые последствия могут быть весьма значительными (как положительные, так и отрицательные).

Для того, чтобы выяснить приемлемость вносимых конструкционных изменений, можно указать следующие критерии, относительно которых необходимо сопоставлять новые характеристики твэлов, ТВС, активной зоны, реактора.

1. Достигаемая глубина выгорания топлива при проектном обогащении должна быть, с одной стороны, выше проектной (что и является исходной целью вносимых изменений) или сохраняться на проектном уровне при пониженном обогащении; с другой стороны, повышенная глубина выгорания топлива должна быть на уровне, при котором обеспечивается работоспособность твэл в течение срока пребывания их в реакторе.

Предельно допустимое значение глубины выгорания топлива в значительной мере зависит от соотношения геометрических размеров основных компонентов (двуокиси урана, оболочки, газового объема), а также от рабочих параметров под оболочкой твэл и прежде всего, конечно, от удельных тепловых нагрузок. Характер и степень влияния вносимых в конструкцию изменений анализируются соответствующими термомеханическими расчетами.

2. Теплогидравлические характеристики ТВС зависят от геометрических размеров элементов топливной решетки и компоновки основных конструкционных узлов (твэл, направляющих каналов ПЭЛ, чехлов ТВС, дистанциирующих решеток). Их влияние на режимы охлаждения твэл в различных ситуациях также должно предварительно анализироваться путем проведения теплогидравлических расчетов, как для нормальных условий, так и при нарушениях нормальных условий и при постулируемых авариях. Далее могут потребоваться экспериментальные проверки.

3. Динамические характеристики активной зоны в целом и поведение реактора в различных ситуациях в значительной мере находятся в зависимости от величин коэффициентов реактивности по параметрам теплоносителя. От знаков этих величин обратная связь с мощностью изменяется принципиальным образом (от отрицательной до положительной). Соответствующие анализы требуют проведения достаточно детальных нейтронно-физических расчетов коэффициентов реактивности и расчетов переходных и аварийных режимов.

4. Особое место должны занимать исследования по проверке приемлемости (или для определения необходимых изменений) водно-химического режима теплоносителя I контура в том случае, если намечено использование других, отличных от проектных материалов для изготовления конструкционных элементов ТВС. При этом обоснование новой конструкции должно быть как расчетное (с точки зрения поведения и свойств нового материала во всех проектных режимах), так и экспериментальное для проверки долгосрочных эффектов взаимодействия этого материала с теплоносителем.

5. При изменении принципов взаимодействия конструкционных элементов ТВС или технологии их изготовления необходимо проведение представительных ресурсных испытаний (прочностных, вибрационных и др.).

Одновременно с указанием основных критериев, характеризующих приемлемость нового измененного топлива, следует отметить важную специфику данной проблемы. Она состоит в том, что измененное топливо предназначается к использованию в эксплуатируемых реакторах, проекты которых разрабатывались на основе норм и требований, действовавших в прошлом. Зачастую новые проекты реакторов разрабатываются уже по современным нормам, значительно более жестким, и это позволяет ориентироваться на повышенные характеристики топлива (прежде всего глубину выгорания). В действующих же реакторах при использовании нового топлива или при организации новых топливных циклов, как правило, исходят по-прежнему из устаревших норм и требований, по которым разрабатывались ?старые¦ реакторы. Сказанное, прежде всего относится к оценкам радиационной безопасности, в обеспечении которой именно характеристики топлива могут играть основную роль, если исходить из трудностей внесения соответствующих изменений в станционные системы и регламенты эксплуатации. Представляется недопустимым в погоне за экономически более высокими показателями в топливоиспользовании на стареющих реакторах исходить из обеспечения безопасности только в соответствии с одновременно устаревшим нормативными документами. Во внимание должны приниматься современные нормы радиационной безопасности, т.е. именно в этих случаях необходимо соблюдение принципа ?Alаra¦.

В течение 1999 г. в РНЦ ?Курчатовский институт¦ проводились комплексные аналитические исследования, направленные на оценку изменений, вносимых в конструкцию твэл и ТВС реактора ВВЭР-440 [2]. Результаты исследований подтвердили, что основной целью зарубежных поставщиков является увеличение глубины выгорания топлива при заданном неизменном исходном обогащении. Цель достигается в одних случаях путем повышения водо-уранового отношения топливной решетки и увеличения загрузки двуокиси урана в твэл; в других - еще большим повышением водо-уранового отношения решетки, в том числе за счет уменьшения загрузки топлива в ТВС.

В первом случае количество воды увеличивается за счет уменьшенной толщины оболочки твэл, в основном, уменьшением ее наружного диаметра, во втором - дополнительный эффект получается из-за уменьшения числа твэл в ТВС и загрузки топлива. В обоих случаях уменьшается поверхность охлаждения твэл и увеличиваются поверхностные удельные нагрузки.

Во втором случае возрастают и линейные нагрузки. Кроме того, для увеличения загрузки топлива в твэл исключаются отверстия в таблетках. В результате этого возрастают средняя температура топлива и количество аккумулированного тепла в двуокиси урана.

Установленные расчетным путем количественные изменения характеристик позволяют сделать вывод, что некоторые параметры, сравниваемые с соответствующими критериями, имеют незначительные отклонения и, по-видимому, приемлемы (запас до кризиса теплоотдачи, давление под оболочкой твэл и др.) Другие как, например, коэффициенты реактивности по температуре замедлителя, хотя и имеют небольшие изменения по величине, однако, изменяют свой знак (- на +), что в соответствии с российскими нормами вообще для ВВЭР недопустимо (в критическом состоянии), и требуется введение выгорающего поглотителя в топливо. Третьи параметры заметно изменяют численные значения (например, температуры двуокиси в центре таблеток), и, хотя они остаются приемлемыми для стационарного режима работы, могут заметно увеличить температурный выбег оболочек в аварийных процессах с течью I контура и повлиять на число твэл, разгерметизирующихся в таких случаях, а значит и на суммарный выход активности в реакторное помещение и в окружающую среду. Это особенно важно учитывать в анализах безопасности, т.к. аварийный режим может происходить при увеличенной глубине выгорания в новом топливе (что является основной целью вносимых изменений), когда при переходе через определенное граничное значение резко возрастает выход продуктов деления из двуокиси урана под оболочку твэл уже в стационарном режиме.

При аналогичной схеме размещения ТВС в активной зоне (отечественного производства и зарубежного поставщика) имеет место значительное различие в неравномерности распределения энерговыделения при увеличенной продолжительности топливного цикла в случае измененных ТВС. Если изменить схему размещения ТВС с целью выравнивания распределения энерговыделения, эффект от внесенных изменений уменьшается.

При проведении анализов реактивностных аварий (выброс органа СУЗ) следует особое внимание уделять не только достигаемым параметрам процесса, но и специфике поведения облученного материала оболочек твэл зарубежной поставки. Известны данные [ 3], согласно которым облученный циркаллой-4 допускает существенно более низкую энтальпию энерговыделения, чем облученный сплав Э-110. Вследствие этого конечной целью анализа реактивностной аварии должно быть не только вычисление средней энтальпии по радиусу таблетки, максимальных температур оболочек и % толщины их окисления, а определение увеличенного числа разгерметизирующихся твэл и выброса активных продуктов деления в сравнении с проектным случаем.

Аналогичные расчеты по указанным направлениям проводились и проводятся для ТВС реактора ВВЭР-1000.

В таблицах 1 и 2 представлены некоторые результаты нейтронно-физических, теплогидравлических и термомеханических расчетов применительно к твэлам, ТВС и активным зонам реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000.

Некоторые расчетные значения параметров указывают на необходимость дальнейших анализов безопасности для определяющих проектных режимов. Эти анализы проводятся в настоящее время, причем конечной целью намечено получение количественных характеристик по числу разгерметизирующихся твэл и по выбросам активности в постулируемых авариях и сопоставление их с действующими в настоящее время нормативными пределами (в частности, с гайдом YVL6.2 (Финляндия), согласно которому число повреждающихся твэл не должно превышать 10% от полного количества в постулируемых авариях класса 2).

Из сказанного выше не следует, что совершенствование топлива для ВВЭР с учетом повышающихся требований по обеспечению безопасности в новых проектах нецелесообразно. Наоборот, соответствующие проработки должны проводиться, в том числе и применительно к эксплуатируемым реакторам. Но одновременно с необходимым углублением исследований по традиционным конструкциям необходимо расширить объем поисков и при более решительных изменениях конструкции твэл и ТВС, поскольку это может привести к положительным результатам по многим показателям при соизмеримых затратах средств. Например, радикально уменьшить диаметр твэлов в реакторх ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 [4 ].

Таблица 1

Некоторые исходные характеристики и результаты расчетов для ТВС реактора ВВЭР-440

|  |  |
| --- | --- |
|  | Поставщики ТВС |
| ОАО ?МСЗ¦ | BNFL | EVF | W |
| **Исходные характеристики** 1. Размер чехла ТВС ?под ключ¦, мм. | 143,0 | 144,2 | 144,2 | 143,0 |
| 2. Наружный диаметр твэл, мм. | 9,10 | 8,90 | 8,80 | 8,80 |
| 3. Количество твэл в ТВС. шт. | 126 | 126 | 120 | 126 |
| 4. Диаметр топливной таблетки, мм. | 7,59 | 7,63 | 7,53 | 7,57 |
| 5. Толщина оболочки твэл, мм. | 0,67 | 0,55 | 0,55 | 0,57 |
| 6. Диаметр центрального отверстия в таблетке, мм. | 1,20 | - | - | - |
| 7. Шаг твэл в решетке, мм. | 12,20 | 12,28 | 12,28 | 12,20 |
| **Расчетные характеристики** 8. Достигаемая глубина выгорания топлива, МВт.сут/кг. урана | 33,00\*37,84\* | 34,6039,45\* | 35,2040,15\* | 34,40 |
| 9. Максимальный коэффициент неравномерности в мощности ТВС\* и твэл в ТВС | 1,31\*1,125 | 1,34\*1,105 | 1,44\*1,069 | 1,126 |
| 10. Максимальная мощность твэл, квт | 46,4\* | 47,4\* | 50,5\* | - |
| 11. \*Коэффициент реактивности по температуре воды, оС-1 (начало цикла, 260оС) | -3,6? 10-5 | - 3,2 10-5 ` ` `  | +1,0? 10-5 | - |
| 12. \*Минимальный запас до кризиса теплообмена. | 3,10 | 3,95 | 2,60 | - |
| 13. Максимальная температура топлива, о K. | 13481483\* | 14011652\* | 13781703\* | 1425 |
| 14. Окружная остаточная деформация оболочек твэл, %.  | -0,36 | - 0,46 | -0,45 | - |

\* Трехмерные расчеты

Таблица 2

Некоторые исходные характеристики и результаты расчетов для ТВС реактора ВВЭР-1000

|  |  |
| --- | --- |
|  | Поставщики ТВС |
| ОАО ?МСЗ¦ | EVF | W |
| **Исходные характеристики** 1. Шаг размещения ТВС. мм | 236 | 236 | 236 |
| 2. Наружный диаметр твэл, мм. | 9,10 | 8,90 | 9,14 |
| 3. Количество твэл в ТВС. шт. | 312 | 312 | 312 |
| 4. Диаметр топливной таблетки, мм | 7,57 | 7,43 | 7,84 |
| 5. Толщина оболочки твэл, мм. | 0,63 | 0,60 | 0,57 |
| 6. Диаметр центрального отверстия, мм | 2,20 | - | - |
| 7. Шаг твэл в решетке, мм | 12,75 | 12,75 | 12,75 |
| **Расчетные характеристики** 8. Достигаемая глубина выгорания топлива, МВт.сут/кг урана | 39,0 | 40,0 | 38,8 |
| 9. Максимальный коэффициент мощности твэл в ТВС | 1,053 | 1,056 | 1,062 |
| 10. Минимальный запас до кризиса теплообмена | 2,72 | 2,78 | 2,92 |
| 11. Максимальная температура топлива, K о  | 1733 | 1899 | 2212 |
| 12. Максимальное давление в твэле, МПа | 6,46 | 5,94 | 5,54 |
| 13. Окружная остаточная деформация оболочек твэл, %  | -0,434 | -0,419 | -0,371 |

**Список литературы**

Development of a New VVER-440 Fuel Design, David Concill, Totju Totev, The Nuclear Engineering, V.40, No. 3.

Future fuel: Vattenfall-s new approach. The Nuclear engineering, September 1997, p.25-28.

Special issue of ?Nuclear Safety, V. 37, No 4, 1996.

?Основные преимущества и возможные пути перевода реактора ВВЭР-440 на ТВС с твэлами уменьшенного диаметра, Лунин Г.Л. и др. (РНЦ ?КИ¦), Панюшкин А.К. и др.(ОАО¦МСЗ¦), Афров А.М. и др.( ОКБ), Сборник докладов международной конференции ?Ядерное топливо для человечества, 5-8.10.98, г.Электросталь, Россия.