

РАСЧЕТНО-КОНСТРУКТОРСКИЕ ПРОРАБОТКИ АКТИВНЫХ ЗОН ВВЭР СО СПЕКТРАЛЬНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

И.Н. Васильченко, В.М. Махин, С.А. Кушманов, С.Н. Антонов,
В.В. Вьялицын, Р.И. Васильченко
ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», г. Подольск, Россия
П.Н. Алексеев, В.Ф. Горохов, А.С. Духовенский, Л.Л. Кобзарь,
А.П. Никонов, А.В. Чибиняев
НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

Введение

В настоящее время дискутируется вопрос о месте легководных энергетических реакторов в энергетике 21 века. Установленный срок эксплуатации создаваемых реакторных установок ВВЭР-1200 равен 60-ти годам. Поэтому актуальна проработка вопросов по эффективности топливоиспользования в ВВЭР в открытом топливном цикле (переходный период к замкнутому топливному циклу), а также применение ВВЭР в замкнутом топливном цикле.

Предлагаются два направления развития технологии ВВЭР:

- эволюционный проект ВВЭР с пониженным расходом природного урана (ВВЭРС);
- инновационный проект ВВЭР с теплоносителем сверхкритических параметров и повышенным коэффициентом воспроизводства делящихся нуклидов (ВВЭР-СКД).

В настоящей работе рассматриваются предварительные конструкторские проработки новых активных зон ВВЭР-600С и ВВЭР-1000С, выполненные специалистами ОКБ «ГИДРОПРЕСС». Пониженный расход природного урана обеспечивается так называемым спектральным регулированием выгорания топлива, т.е. изменением водно-уранового (ВОУ) отношения. Нейтронно-физические и теплогидравлические исследования выполнены специалистами НИЦ «Курчатовский институт».

1. Физические принципы повышения топливоиспользования путем изменения спектра нейтронов в активной зоне

Одним из основных факторов, влияющих на процесс выгорания топлива, является формируемый спектр нейтронного потока. Управление спектром позволит вместе с поддержанием непрерывной цепной реакции в течение кампании использовать избыточное количество нейтронов на образование новых делящихся изотопов из U-238 (в настоящее время в реакторах ВВЭР эти нейтроны частично поглощаются борной кислотой и выгорающим поглотителем, например, гадолинием). Основным способом воздействия на спектр нейтронов является изменение соотношения концентрации ядер замедлителя и топлива, то есть ВОУ. Реальным на данном этапе представляется изменение ВОУ в ТВС путем применения кластерной системы вытеснителей (аналогично системе пэлов). Введение вытеснителей приводит к снижению ВОУ, а выведение – к повышению ВОУ. Диапазон изменения ВОУ равен 1÷2. Кроме того, в вытеснителе могут быть размещены твэлы с топливом на основе природного или отвального урана, что позволяет увеличить количество нарабатываемого плутония в ТВС.

2. Конструкторские проработки ТВС

Для реализации вышеприведенных принципов спектрального регулирования были выполнены проработки конструкции ТВС (рис. 1) и активной зоны с применением стержней-вытеснителей на базе отработанных решений по активной зоне ВВЭР-1000 (В-320).

Поскольку для размещения вытеснителей при сохранении основных параметров, таких как диаметр твэла и размер ТВС “под ключ” уменьшилась греющая поверхность, то расчетные оценки выполнялись для пониженной (по отношению к В-320) тепловой мощности 1600 МВт (ВВЭР-600, который при реализации спектрального регулирования получил обозначение ВВЭР-600С).

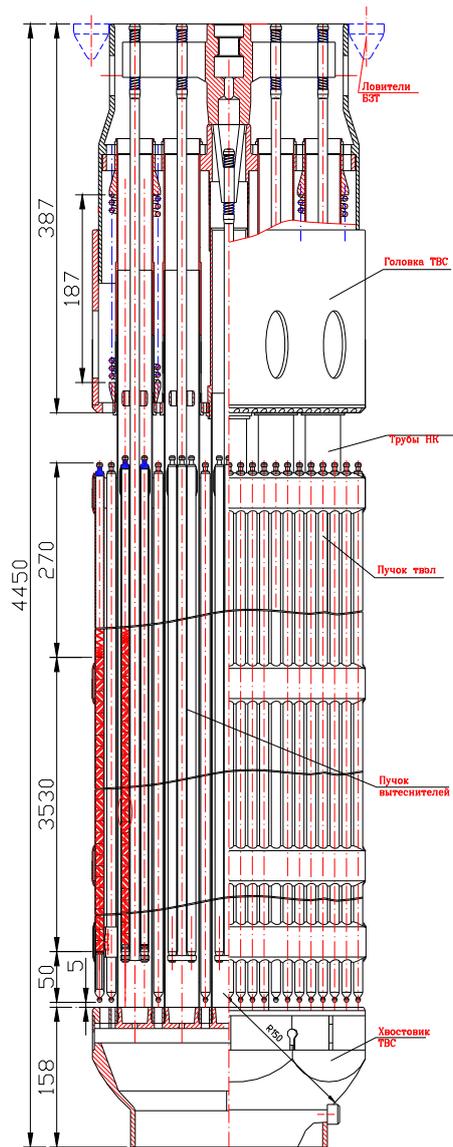


Рис. 1 – ТВС ВВЭР-600С

вибростойкости и допустимых усилий трения при перемещении вытеснителя. Сечение по пучку представлено на рис. 2 и 3. Как видно, широко расставленные по сечению направляющие каналы дают возможность оптимизировать количество точек сварки при сохранении требуемой жесткости ТВС.

Дистанцирующая решетка (ДР) выполняется из ячеек, аналогичных используемым в конструкции ДР ТВС-2М, установленных по треугольной сетке с шагом 11,64 мм (12,75 мм в проекте В-320). Тепловыделяющие элементы практически полностью повторяют конструкцию твэлов ТВС-2. Отличие связано с тем, что они не имеют крепления в нижней решетке. Данный вариант конструкции пучка в настоящее время предлагается к проработке для конструкций типа ТВС-2 реактора ВВЭР-320.

Основная цель выполненных конструкторских проработок – показать принципиальную возможность технической реализации идеи спектрального регулирования и на основе технических решений по ТВС оценить их эффективность.

Наличие вытеснителей предполагает как минимум два варианта работы активной зоны в зависимости от типа вытеснителей:

- использование полых вытеснителей – позволяет накапливать плутоний в выгорающем топливе, а после извлечения вытеснителей – выжигать его;
- использование вытеснителей с естественным (отвальным) ураном. В этом случае вытеснители могут работать как поглотители нейтронов и использоваться для накопления плутония.

В результате конструкторских проработок показана преимущество технических решений как по конструкции ТВС, так и по конструкции вытеснителей. Изменение водоуранового отношения составило от 1,25 (при введенных вытеснителях) до 2,32 (при извлеченных вытеснителях) В качестве несущей конструкции так же как и в ТВС-2М используется жесткий каркас, образованный приваркой дистанционирующих решеток к направляющим каналам. Форма направляющего канала (рис. 4) в виде профилированной шестигранной трубы обусловлена конструкцией вытеснителя, выполненного в виде 6 твэлов $\varnothing 8,6$ мм, закрепленных на циркониевом прутке. Конструкция вытеснителя выбрана для обеспечения достаточности охлаждения

ТВЭЛОВ в вытеснителе, обеспечения

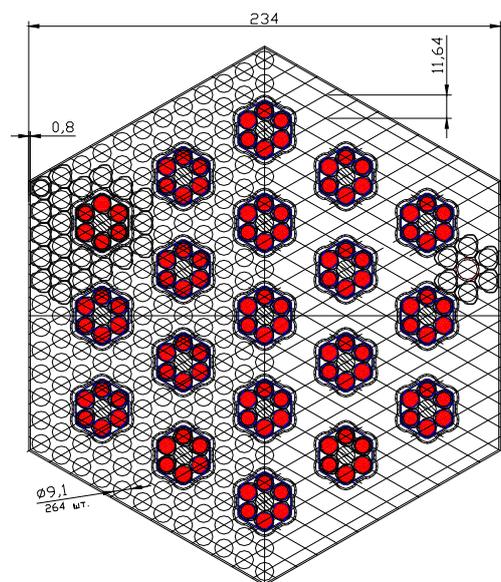


Рис. 2 – Сечение по пучку ТВС

Отличия конструкции нижней решетки от нижней решетки ТВС-2М связаны с конструкцией направляющих каналов и отсутствием крепления твэлов в ней. Хвостовик ТВС полностью соответствует конструкции хвостовика ТВС-2М и выполняет те же функции. Головка ТВС – съемная. В ней использованы те же принципиальные решения и, соответственно, она выполняет те же функции, что и головка ТВС-2М. Различие связано с тем, что направляющие каналы вытеснителей

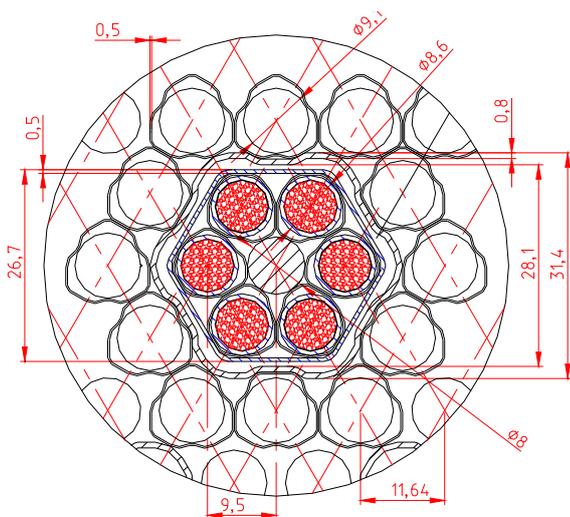


Рис. 3 – Сечение вытеснителя

расположены равномерно по сечению ТВС. Это нашло отражение в том, что обечайки выполнены шестигранными. Как показали проработки конструкций головки, пучка и вытеснителей, необходима корректировка конструкции блока защитных труб (БЗТ). Так фиксация ТВС в плане должна осуществляться ловителями в форме штырей $\varnothing 35$ мм, расположенным по углам

шестигранника сечения ТВС (рис. 4). Шестигранная форма головки, а также то, что элементы вытеснителя образуют довольно жесткий пучок из 6 твэлов, закрепленных на циркониевом прутке (рис. 4), предполагает отсутствие направляющего аппарата в БЗТ.

Таким образом, проведенные проработки показали принципиальную возможность изготовления ТВС с выемным поглотителем. Одной из основных задач последующих конструкторских работ будет являться создание надежного привода, способного перемещать сборку вытеснителей с твэлами из отвального урана весом до ~ 250 кг (без учета выталкивающей силы).

По каркасу потребуется технологическая отработка конструкции ДР как основного поля, так и вытеснителя, а также создание производства тонкостенных профилированных шестигранных труб.

В рамках НИОКР потребуется выполнить пролив макетов с целью определения гидравлических характеристик ТВС с поднятыми и опущенными вытеснителями, определить жесткостные, вибрационные и термоциклические характеристики (в том числе и вытеснителей), выбрать параметры пружинного блока, определить силы трения при извлечении вытеснителей.

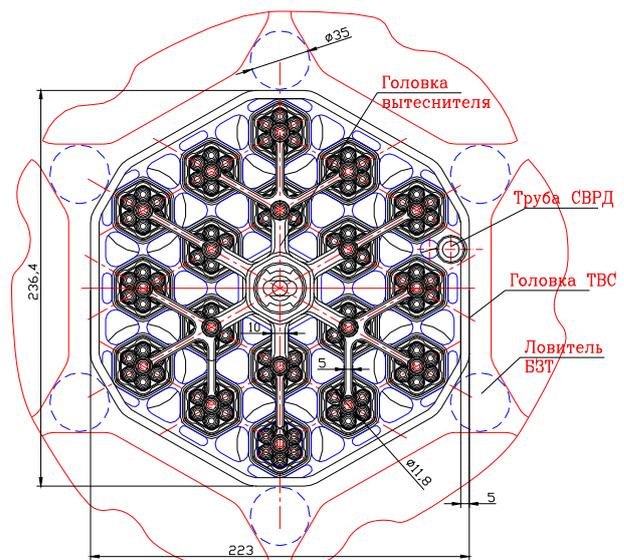


Рис. 4 - Вид сверху на ТВС с установленным вытеснителем

3. Нейтронно-физические и теплогидравлические расчеты

На основе представленных выше конструкторских проработок НИЦ КИ были выполнены нейтронно-физические и теплогидравлические оценки. Проведены предварительные сравнительные оценки эффективности топливного цикла АЭС с ВВЭР-600

со штатной конструкцией активной зоны и активной зоны со спектральным регулированием ВВЭР-600С.

На рис. 5 представлена картограмма активной зоны ВВЭР-600С. Темным цветом на картограмме отмечены ТВС, в которых в стартовый момент работы реактора располагаются вытеснители из обедненного урана.

Спектральное регулирование совмещает функции регулирования реактивности в процессе выгорания топлива. Последовательное извлечение вытеснителей с твэлами из обедненного урана (последовательность извлечения из активной зоны показана на рисунке 5) позволяет компенсировать потерю реактивности во время работы реактора при этом борное регулирование не используется. В таблице представлено сравнение основных нейтронно-физических характеристик активной ВВЭР-600 со спектральным регулированием и без него.



Рис. 5 Картограмма активной зоны ВВЭР-600С

Таблица 1 - Основные нейтронно-физические характеристики

Характеристика	ВВЭР-600	ВВЭР-600С (спектральное регулирование)
Продолжительность работы стационарной загрузки, сут	319	320
Обогащение в твэлах вытеснителей, %вес	-	0.2
Загрузка в а.з. (масса вытеснителей), т.т.м.	77(0)	66(11)
Загрузка U^{235} , кг	476	417

Теплогидравлический анализ, выполненный для предельных характеристик энерговыделения ($K_q=1,45$, $K_r=1,63$), показал, что минимальный запас до кризиса теплоотдачи, равный 1,816, получен для ТВС с извлеченными вытеснителями в начале загрузки (т.е. для режима категории 2), при этом максимальная температура оболочки твэла составляет 350°C. Наибольшее кипение получено в конце работы загрузки. Равновесное массовое паросодержание и истинное объемное паросодержание в “горячей” ячейке равны, соответственно, 0,017 и 0,423.

Проведенные исследования показали, что переход от исходного варианта активной зоны ВВЭР-600 на активную зону со спектральным регулированием приводит:

- к уменьшению загрузки U^{235} на 12,5 %,
- к уменьшению топливной составляющей стоимости электроэнергии на ~ 3%,
- к отказу от борного регулирования.

Более заметные преимущества активной зоны со спектральным регулированием следует ожидать при переходе на $(U,Pu)O_2$ топливо в замкнутом ядерном топливном цикле.

Данные исследования предварительные и целесообразно продолжить расчетный анализ преимуществ активных зон со спектральным регулированием для РУ ВВЭР-1000 или ВВЭР-1200 как с оксидным топливом (UO_2), так и с $(U,Pu)O_2$ топливом. Необходимы проработки других вариантов по размещению вытеснителей в ТВС с применением твэлов меньшего диаметра (6,8 вместо 9,1 мм) и/или с увеличенным числом ТВС в активной зоне (211 вместо 163) в корпусе большего диаметра. В последнем случае возможно увеличить тепловую мощность активной зоны до 3600 МВт с применением $(U,Pu) O_2$ топлива.

4. Предварительный анализ аварийных ситуаций для реактора ВВЭР-1000С с твэлами диаметром 6,8мм и для реактора ВВЭР-600С с диаметром твэла 9,1 мм

В данном разделе рассматривается перечень сценариев теплогидравлических расчетов в части исходных событий, связанных с потерей теплоносителя и нарушениями реактивности для состояния блока на мощности.

В качестве исходных рассмотрены следующие события:

- разрыв ГЦТ на входе в реактор;
- неуправляемое извлечение рабочей группы ОР СУЗ из активной зоны;
- выброс одного органа регулирования СУЗ в результате разрыва чехла привода.

4.1. Расчетная модель реакторов ВВЭР-600С и ВВЭР-1000С

Реакторная установка с ВВЭР-600С создается на базе РУ В-498 – двухпетлевой реакторной установки, разработанной на основе проекта АЭС-2006 с учетом специфики двухпетлевой схемы первого контура.

Реакторная установка с ВВЭР-1000С создается на базе РУ В-392 – четырехпетлевой реакторной установки, разработанной на основе проекта АЭС-2006.

Исходя из технического задания на разработку проекта была создана расчетная модель энергоблока с реактором ВВЭРС для кода RELAP5/mod3.2.[1,2].

4.2. Разрыв ГЦТ на входе в реактор эквивалентным диаметром 850 мм для реактора ВВЭР-1000 С

4.2.1. Рассматриваемое исходное событие является проектным условием категории 4 и относится к группе исходных событий, приводящих к уменьшению теплоносителя первого контура. Из всего спектра аварий с разрывами первого контура, наибольшему и длительному тепловому воздействию твэлы активной зоны подвергаются при разрыве ГЦТ на входе в реактор.

Режимы большой течи могут быть идентифицированы по следующим признакам;

- резкое снижение давления в первом контуре;
- снижение уровня в КД и его осушение;
- повышение давления в контейнменте.

При расчете используется консервативный подход к выбору сценария протекания аварии.

Срабатывание АЗ происходит по второму технологическому сигналу с задержкой на 2 с момента достижения уставки.

В момент разрыва ГЦТ происходит обесточивание блока.

При выполнении расчета в качестве единичного отказа принимается отказ одного ДГ, в результате чего в работу не включается следующее оборудование одного канала:

- два насоса низкого давления САОЗ;
- два насоса высокого давления САОЗ;
- два насоса подачи аварийной питательной воды в ПГ;
- отсутствие подачи от одной ГЕ.

Выбор исходного состояния реакторной установки и сценария развития аварии основывается на следующих консервативных предположениях:

- исходное состояние РУ соответствует наиболее неблагоприятному сочетанию отклонений режимных параметров первого контура в пределах погрешности и точности их измерения и регулирования;

- потеря электропитания собственных нужд совпадает по времени с исходным событием;

- работа систем нормальной эксплуатации не учитывается, что является следствием потери электропитания собственных нужд АЭС.

4.2.2. Анализ результатов расчета.

В результате разрыва ГЦТ происходит резкое снижение давления теплоносителя в реакторе до давления насыщения. Первым сигналом на срабатывание АЗ является сигнал по обесточиванию более трех ГЦНА при мощности реактора более 5% $N_{ном}$ (постулируется, что срабатывание АЗ происходит по второму технологическому сигналу), вторым – сигнал по снижению давления над активной зоной до 15,2 МПа (на 0,49 с процесса). Сигнал на движение органов СУЗ поступает через 2 с (по условию сценария аварии) после возникновения сигнала АЗ, т.е. на 2,49 с. Однако снижение мощности начинается раньше в связи с введением отрицательной реактивности из-за вскипания теплоносителя в активной зоне.

Снижение давления, срыв циркуляции теплоносителя в активной зоне приводят к ухудшению теплоотвода от нее. В результате возникает кризис теплообмена на поверхности оболочек твэлов и начинается рост их температуры. Через 1,5 с температура оболочки наиболее напряженного твэла достигает значения 413,8 °С.

Через 20,0 с происходит почти полное осушение реактора. С момента включения емкостей САОЗ начинается повторное заполнение НКР, а после включения в работу насоса ННД, СПЗАЗ начинается заполнение СКР и активной зоны, что способствует ее расхолаживанию.

Во втором контуре ПГ после закрытия СК ТГ и прекращения подачи питательной воды в результате обесточивания начинается рост давления. Через 120 с после обесточивания включаются насосы подачи аварийной питательной воды в ПГЗ-4 (аварийные питательные насосы ПГ1-2 не работают по причине незапуска ДГ1). По сигналу обесточивания открываются БРУ-А для поддержания давления во втором контуре 6,8 МПа. Далее по сигналу «уменьшение запаса до кипения в любой из горячих ниток петель до 8°С» БРУ-А переходят в режим расхолаживания со скоростью 30 °С/ч. Полное закрытие БРУ-А происходит через 17,0 с процесса.

Анализ результатов расчета показывает, что к моменту окончания расчета (10 мин) расход течи компенсируется подпиткой от одного насоса низкого давления САОЗ. Температура теплоносителя в активной зоне устанавливается на уровне 110 °С, давление - на уровне 0,15 МПа; температура оболочек твэл не превышает 115 °С.

Сравнение расчетных значений с критериями приемки представлено в таблице 2

Таблица 2 Сравнение расчетных значений с критериями приемки

Содержание критерия приемки	Достигнутые значения
Давление в системе первого контура и паропроводах ПГ не превышает 115% от расчетного значения, МПа <ul style="list-style-type: none">▪ 20,3 МПа - первый контур▪ 9,32 МПа - второй контур	16,2 (первый контур) 7,41 (второй контур)
Средняя радиальная энтальпия не превышает 830 Дж/г для выгоревшего топлива, 963 Дж/г для свежего топлива	286,2 (максимальная энтальпия)
Топливные таблетки не плавятся даже локально (температура плавления для выгоревшего топлива 2540 °С и температура плавления для свежего топлива 2840 °С)	1233,8
Максимальная температура оболочки твэла не превышает 1200 °С	748,0

4.3. Разрыв ГЦТ на входе в реактор эквивалентным диаметром 850 мм для реактора ВВЭР-600С

4.3.1. Сценарий протекания аварийного процесса аналогичен рассмотренному выше для ВВЭР-1000С.

4.3.2. Анализ результатов расчета.

В результате разрыва ГЦТ происходит резкое снижение давления теплоносителя в

реакторе до давления насыщения. Первым сигналом на срабатывание АЗ является сигнал по обесточиванию более двух ГЦНА при мощности реактора более 5% $N_{ном}$ (поступает, что срабатывание АЗ происходит по второму технологическому сигналу), вторым – сигнал по снижению давления над активной зоной до 15,2 МПа (на 0,38 с процесса). Сигнал на движение органов СУЗ поступает через 2 с после возникновения сигнала АЗ, т.е. на 2,38 с. Однако снижение мощности начинается раньше в связи с введением отрицательной реактивности из-за вскипания теплоносителя в активной зоне.

Снижение давления, срыв циркуляции теплоносителя в активной зоне приводят к ухудшению теплоотвода от нее. В результате возникает кризис теплообмена на поверхности оболочек твэлов и начинается рост их температуры. Через 1,5 с температура оболочки наиболее напряженного твэла достигает значения 413,8 °С.

Через 20,0 с происходит почти полное осушение реактора. С момента включения емкостей САОЗ начинается повторное заполнение НКР, а после включения в работу насоса ННД, СПЗАЗ начинается заполнение СКР и активной зоны, что способствует ее расхолаживанию.

Во втором контуре ПГ после закрытия СК ТГ и прекращения подачи питательной воды в результате обесточивания начинается рост давления. Через 120 с после обесточивания включается насос подачи аварийной питательной воды в ПГ2 (аварийный питательный насос ПГ1 не работает по причине незапуска ДГ1). По сигналу обесточивания открываются БРУ-А для поддержания давления во втором контуре 6,8 МПа. Далее по сигналу «уменьшение запаса до кипения в любой из горячих ниток петель до 8⁰С» БРУ-А переходят в режим расхолаживания со скоростью 30 °С/ч. Полное закрытие БРУ-А происходит через 15,2 с процесса.

Анализ результатов расчета показывает, что к моменту окончания расчета (10 мин) расход течи компенсируется подпиткой от одного насоса низкого давления САОЗ с СПЗАЗ. Температура теплоносителя в активной зоне устанавливается на уровне 110 °С, давление - на уровне 0,15 МПа; температура оболочек твэла не превышает 115 °С.

Сравнение расчетных значений с критериями приемки представлено в таблице 3

Таблица 3- Сравнение расчетных значений с критериями приемки

Содержание критерия приемки	Достигнутые значения
Давление в системе первого контура и паропроводах ПГ не превышает 115% от расчетного значения, МПа <ul style="list-style-type: none"> ▪ 20,3 МПа - первый контур ▪ 9,32 МПа - второй контур 	16,2 (первый контур) 7,41 (второй контур)
Средняя радиальная энтальпия не превышает 830 Дж/г для выгоревшего топлива, 963 Дж/г для свежего топлива	237,2 (максимальная энтальпия)
Топливные таблетки не плавятся даже локально (температура плавления для выгоревшего топлива 2540 °С и температура плавления для свежего топлива 2840 °С)	1029,8
Максимальная температура оболочки твэла не превышает 1200 °С	415,2

Заключение

Выполнены предварительные конструкторские проработки ТВС для ВВЭР-600С и ВВЭР-1000С (со спектральным регулированием), нейтронно-физические и теплогидравлические расчеты.

Показано, что действительно спектральное регулирование приводит к повышению эффективности топливоиспользования. Вместе с тем, на данном этапе положительный эффект не столь значителен, чтобы ограничиться выполненными проработками.

Данные исследования предварительные и целесообразно продолжить расчетный анализ преимуществ активных зон со спектральным регулированием для РУ ВВЭР-1000 или ВВЭР-

1200 как с оксидным топливом (UO_2), так и с $(U,Pu)O_2$ топливом. Необходимы проработки других вариантов по размещению вытеснителей в ТВС с применением ТВЭЛов меньшего диаметра (6,8 вместо 9,1 мм) и/или с увеличенным числом ТВС в активной зоне (211 вместо 163) в корпусе большего диаметра. В последнем случае возможно увеличить тепловую мощность активной зоны до 3600 МВт с применением $(U,Pu)O_2$ топлива.

Выполнены предварительные анализы основных аварийных ситуаций как для ВВЭР-1000С так и для ВВЭР-600С. В данном докладе представлено краткое описание анализа основной аварии, связанной с разрывом ГЦТ на входе в реактор. Показано, что приемочные критерии выполняются с большим запасом. Приемочные критерии выполняются также для режимов:

- неуправляемое извлечение рабочей группы ОР СУЗ из активной зоны;
- выброс одного органа регулирования СУЗ в результате разрыва чехла привода.

Список литературы

1 Fletcher, C.D. and R.R. Schultz, "RELAP5/MOD3 Code Manual, User's Guidelines", NUREG/CR-5535, INEL-95/0174, Vol.5, Rev.1, June 1995.

2 "RELAP5/MOD3 Code Manual, User's Guide and Input Requirements", NUREG/CR-5535, INEL-95/0174, Vol.2, Rev.1, August 1995.