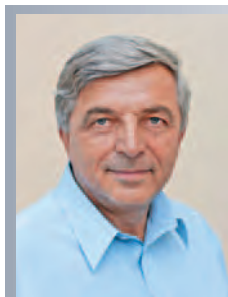




Юрий СЕМЧЕНКОВ,

заместитель
директора НИЦ
«Курчатовский
институт»



Александр ПАВЛОВИЧЕВ,

начальник
лаборатории НИЦ
«Курчатовский
институт»



Александр ЧИБИНЯЕВ,

начальник
лаборатории НИЦ
«Курчатовский
институт»

Близость к сценарию

Перспективы эволюционного развития топлива ВВЭР

Важным и в определенной мере критическим фактором для принятия взвешенной технической политики на несколько десятилетий являются время и масштаб дальнейшего присутствия и доминирования в структуре ядерной энергетики технологии корпусных водоохлаждаемых реакторов на тепловых нейтронах

Наиболее очевидными этапами развития атомной энергетики являются: этап открытого топливного цикла ядерной энергетики (потребление урана-235), переходный этап от открытого к замкнутому топливному циклу и этап замкнутого топливного цикла (переход на использование урана-238 и тория-232) с реализацией расширенного воспроизводства делящихся изотопов.

Ближайшей задачей первого этапа является создание на базе АЭС-2006 усовершенствованного блока АЭС — ВВЭР-ТОИ электрической мощностью 1300 МВт с внедрением до 2020 года.

Становится актуальным формирование образа нового поколения легководных реакторов, приемлемых для второго и третьего этапов развития ядерной энергетики. Поставлена задача создания четвертого поколения реакторов ВВЭР для работы на переходном этапе и в замкнутом топливном цикле. Это направление инновационного реактора с кардинально улучшенным использованием топлива получило название «СУПЕР-ВВЭР» (далее ВВЭР-С).

Этап открытого топливного цикла

С момента пуска первого реактора ВВЭР ядерное топливо непрерывно совершенствуется с целью повышения

эффективности его использования, увеличения выработки электроэнергии путем повышения тепловой мощности реактора и увеличения коэффициента использования установленной мощности энергоблока при обеспечении требований безопасности эксплуатации.

В результате многолетних исследований сформировалась современная штатная тепловыделяющая сборка (далее — ТВС) реактора типа ВВЭР-1000 (ТВС-2, ТВСА), обладающая следующими основными конструктивными особенностями: формоустойчивый циркониевый каркас, внешний диаметр твэла — 9.1 мм, толщина циркониевой оболочки твэла — 0.685 мм, диаметр топливной таблетки — 7.6 мм, в центре топливной таблетки имеется отверстие, максимальное обогащение топлива — 4.4%, высота топливного столба — 3530 мм, в качестве выгорающего поглотителя используется интегрированный в топливо гадолиний. Среднее выгорание ТВС находится в пределах 50 МВт*сут/кгU. ТВС указанной конструкции успешно эксплуатируется на большинстве АЭС с ВВЭР-1000 в 12-месячном топливном цикле. Данная конструкция обеспечивает возможность реализации топливных циклов с длительностью кампании до 450 эффективных суток.

В настоящее время с учетом тенденций к переходу на 18-месячный топливный цикл и повышению мощности блока до 104% номинальной совершенствование топлива

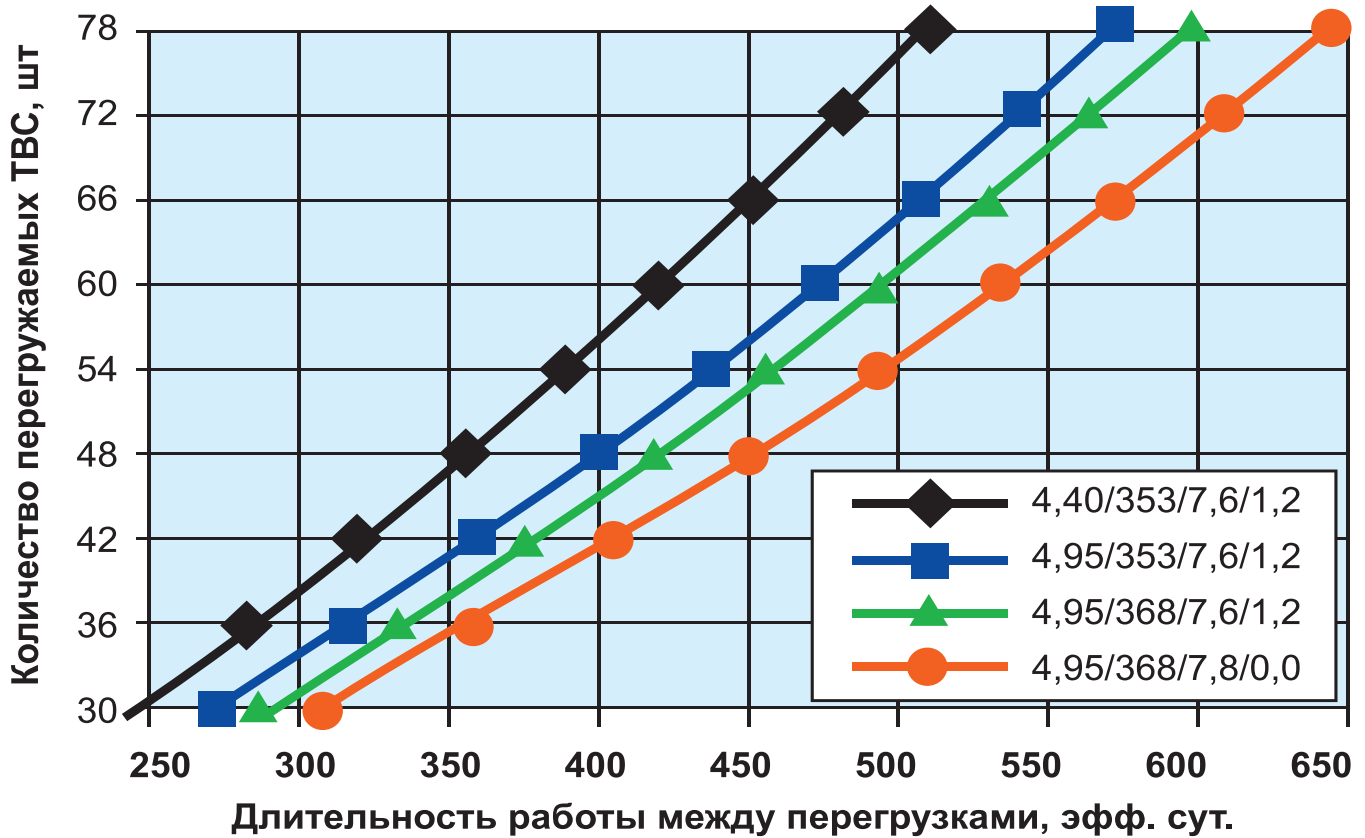


Рис. 1. Зависимость количества загружаемых ТВС от длительности работы между перегрузками для различных конструкций ТВС (обогащение топлива/высота топливного столба/диаметр топливной таблетки/диаметр осевого отверстия)

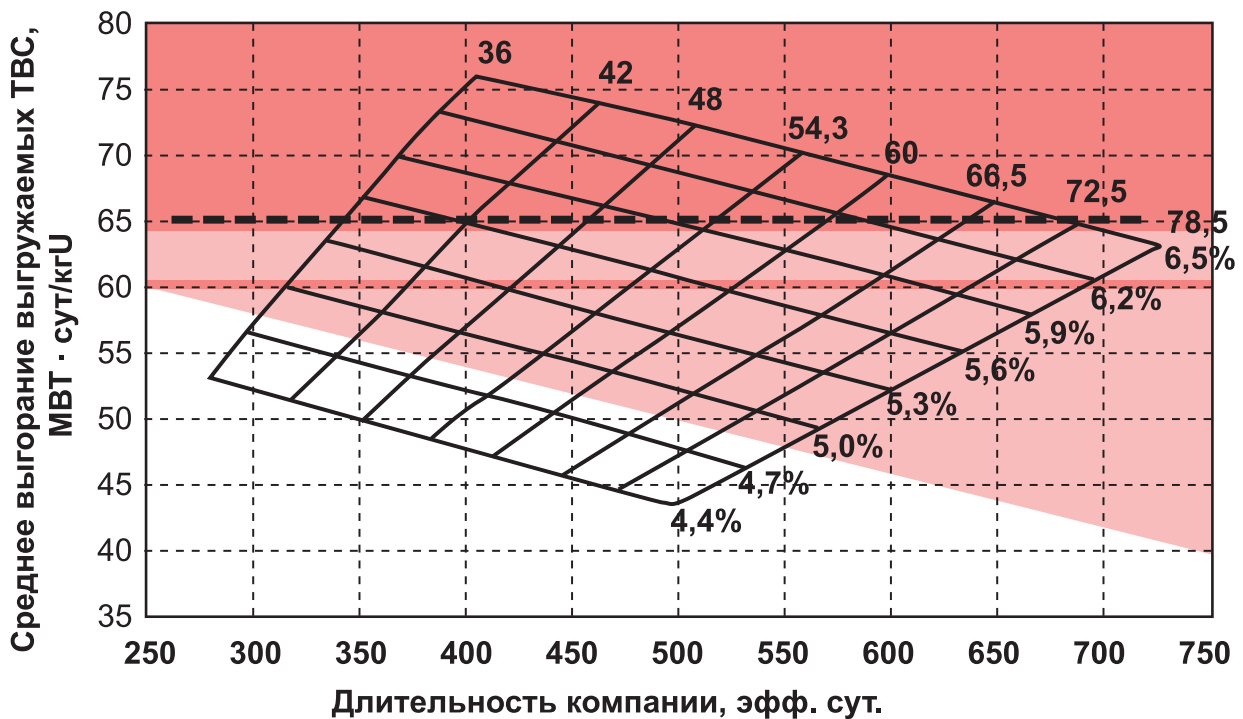


Рис. 2. Зависимость среднего выгорания выгружаемых ТВС от длительности кампании, количества загружаемых ТВС и их обогащения (верхняя подпись по оси абсцисс соответствует топливной таблетке с внешним диаметром 7.6 мм и центральным отверстием, нижняя подпись — топливной таблетке без центрального отверстия с внешним диаметром 7.8 мм)

ВВЭР-1000 осуществляется путем увеличения энергопотенциала ТВС, т.е. увеличения количества тепловой энергии, которую способна произвести ТВС в реакторе. Повышение энергопотенциала ТВС обеспечивается увеличением массы урана и урана-235 в ТВС за счет:

- повышения обогащения до 4.95%;
- удлинения топливного столба в твэле на 15 см;
- увеличения внешнего диаметра топливной таблетки до 7.8 мм путем уменьшения толщины оболочки твэла до 0.585 мм при одновременном отказе от центрального отверстия в топливной таблетке.

Рис. 1 (стр. 25) иллюстрирует изменение длительности кампании реактора ВВЭР-1000 в зависимости от количества загружаемых ТВС для различных вариантов ее конструкции.

Выполненные оценки показывают, что усовершенствованная конструкция ТВС в 12- и 18-месячных циклах обеспечивает:

- снижение удельного расхода природного урана на ~ 6 – 9%;
- снижение количества загружаемых ТВС на 15 – 30%.

Также обеспечивается возможность формирования топливных загрузок с длительностью работы до 600 эфф. суток. При этом среднее выгорание ТВС в 12- и 18-месячных топливных циклах составит около 57 и 50 МВт•сут/кг соответственно. В настоящее время ТВС-2 М конструкции ОКБ «ГИДРОПРЕСС» с обогащением 4.95% и высотой топливного столба 368 см используется на Балаковской и Ростовской АЭС, а ТВСА конструкции ОКБМ с обогащением 4.7% и топливной таблеткой с внешним диаметром 7.8 мм

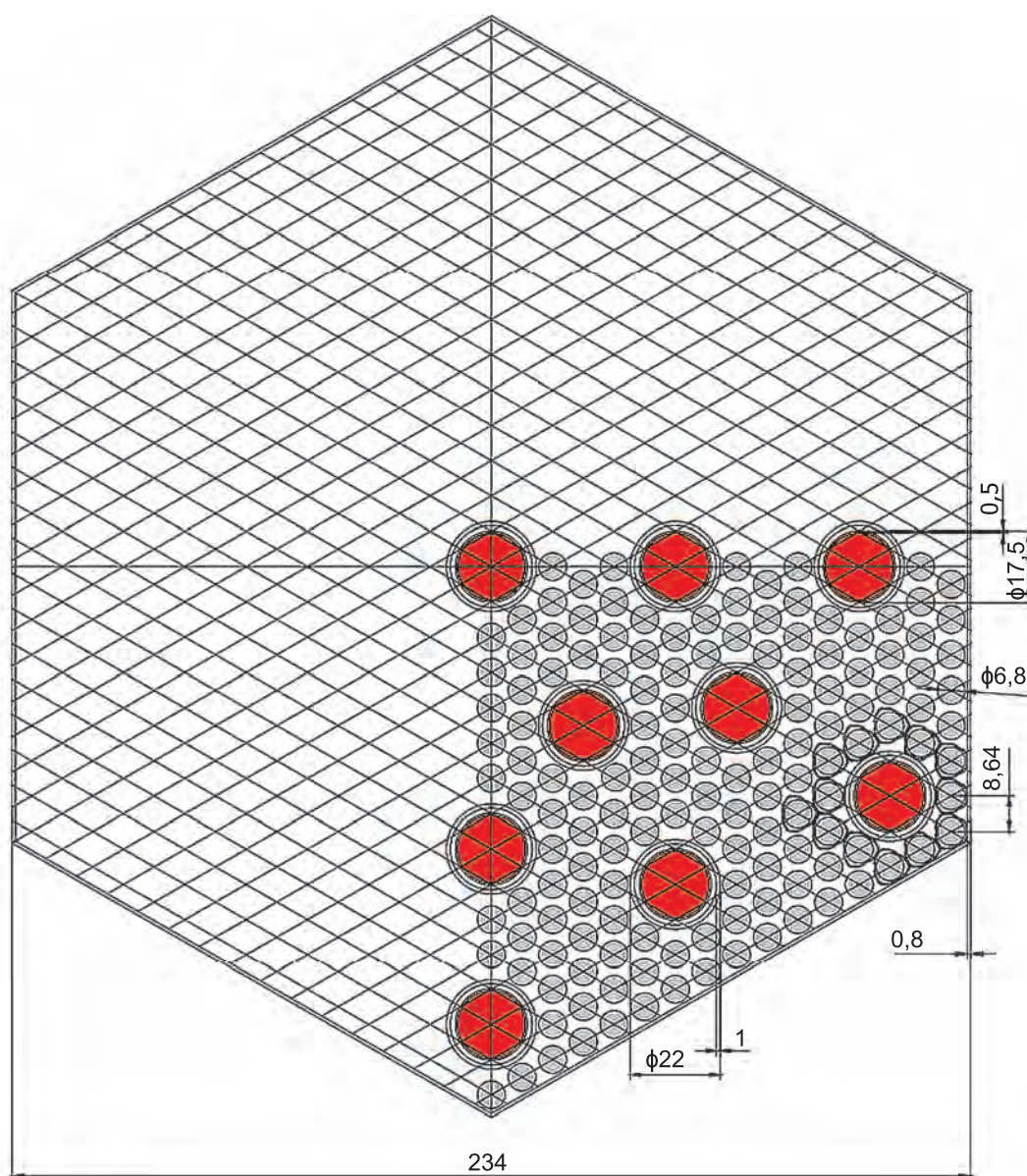


Рис. 3. Картограмма модернизированной ТВС ВВЭР-1000 со спектральным регулированием

без центрального отверстия применяется на блоке № 1 Калининской АЭС. В ближайшей перспективе планируется внедрение ТВС новых конструкций на остальных АЭС с реакторами ВВЭР-1000.

Для ядерного топлива ВВЭР-1000 рассматриваются следующие перспективные варианты топливного цикла, выбор между которыми делает потребитель:

- топливный цикл $3 * 1,5$ с продолжительностью кампании реактора до 510 эфф. суток;
- топливный цикл $5 * 1,0$ с продолжительностью кампании реактора до 320 эфф. суток.

Предполагается, что в период до 2015 года топливный цикл $3 * 1,5$ в условиях повышенной до 104% тепловой мощности будет основным для российских энергоблоков с реактором ВВЭР-1000.

Последующее эволюционное развитие топлива ВВЭР, по-видимому, будет осуществляться в направлении дальнейшего увеличения энергopotенциала ТВС за счет увеличения обогащения топлива свыше 5%. Обогащение 5% является в настоящее время исторически сложившимся пределом обогащения топлива для легководных реакторов как в России, так и за рубежом. На это значение обогащения спроектировано и лицензировано оборудование по производству и транспортировке топлива. Как правило, на это обогащение выполняются современные обоснования безопасности АЭС с легководными реакторами. В требованиях к легководным реакторам, рассчитанным на перспективу, указывается на необходимость обеспечения интервала работы между перегрузками в течение 24 месяцев (около 680 – 700 эфф. суток), а также на достижение среднего выгорания ТВС порядка 60 – 65 МВт•сут/кгU. Согласно выполненным в РНЦ «Курчатовский институт» предварительным оценкам, в реакторах ВВЭР на оксидном топливе эти требования могут быть выполнены только при повышении обогащения свыше 5%. К аналогичному выводу для реакторов типа PWR приходят и зарубежные специалисты.

На рис. 2 (стр. 25) для реактора АЭС-2006 (длина топливного столба 373 см) представлена зависимость среднего выгорания топлива от количества загружаемых ТВС, их обогащения и длительности кампании. Зависимость получена для двух типов топливных таблеток:

- топливная таблетка с внешним диаметром 7.6 мм и центральным отверстием диаметром 1.2 мм;
- топливная таблетка без центрального отверстия с внешним диаметром 7.8 мм.

На основании данных, представленных на рис. 2, можно сделать следующие выводы:

- в 18-месячном цикле повышение обогащения свыше 5% позволит снизить количество ТВС подпитки на 15 – 20% и увеличить выгорание топлива примерно на 20% до уровня порядка 60 МВт•сут/кг;
- повышение обогащения выше 5% позволит реализовать полноценный 24-месячный топливный цикл с длительностью кампании порядка 670 эфф. сут.

Выполненные оценки показывают, что при повышении обогащения топлива свыше 5% в 18- и 24-месячных циклах

топливная составляющая себестоимости производства электроэнергии падает примерно на 6 – 9%.

Для обеспечения отрицательной обратной связи по температуре теплоносителя и выравнивания полей энерговыделения в 18- и 24-месячных циклах необходимо использовать выгорающие поглотители. Наряду с освоенным в реакторах ВВЭР гадолинием в перспективных циклах целесообразно рассмотреть применение эрбия, который успешно используется в реакторах РБМК. В отличие от гадолиния, который размещается в небольшом количестве (от 2 до 10%) твэлов, эрбий можно гомогенно размещать в топливе всех твэлов.

Применение уран-эрбиевого топлива в сочетании с обогащением выше 5% дает следующие дополнительные преимущества:

- снижение неравномерности энергораспределения на 5 – 8%, что повышает гибкость топливного цикла при эксплуатации и создает предпосылки для более эффективного использования ядерного топлива, снижения потока нейтронов на выгорядку и корпус реактора, повышения тепловой мощности реактора и улучшения маневренных характеристик энергоблока;
- обеспечение ядерной безопасности при производстве ТВС и обращении с топливом на АЭС на уровне топлива с обогащением ниже 5%;
- повышение точности расчета распределения энерговыделения (по оценкам около 3%);
- возможность реализации 24-месячных топливных циклов, в которых использование уран-гадолиниевых поглотителей затруднено из-за проблем с неравномерностью энергораспределения.

К недостаткам эрбиевого поглотителя следует отнести некоторое сокращение кампании (на 2 – 3% по сравнению с гадолинием), связанное с недовыгоранием эрбия в конце кампании.

Таким образом, в среднесрочной перспективе целесообразно рассматривать оксидное топливо с обогащением выше 5% в сочетании с эрбием в качестве выгорающего поглотителя, что позволит обеспечить дальнейшее повышение технико-экономических показателей реакторов типа ВВЭР-1000.

Основными требованиями к конструкциям ТВС ВВЭР-1000 и РУ АЭС-2006 для обеспечения внедрения эффективных топливных циклов являются:

- длительный эксплуатационный ресурс — до 6 лет;
- среднее по ТВС выгорание топлива до 68 МВт•сут/кг U;
- уровень эксплуатационной надежности ~10 (-6) 1/год;
- разборные конструкции для проведения ремонта в условиях АЭС;
- возможность эксплуатации в маневренных режимах.

Кроме увеличения загрузки урана-235, в ТВС производится оптимизация гидравлических характеристик и интенсификация теплообмена для повышения эксплуатационной надежности топлива, увеличения запасов до кризиса теплоотдачи и повышения мощности ТВС.

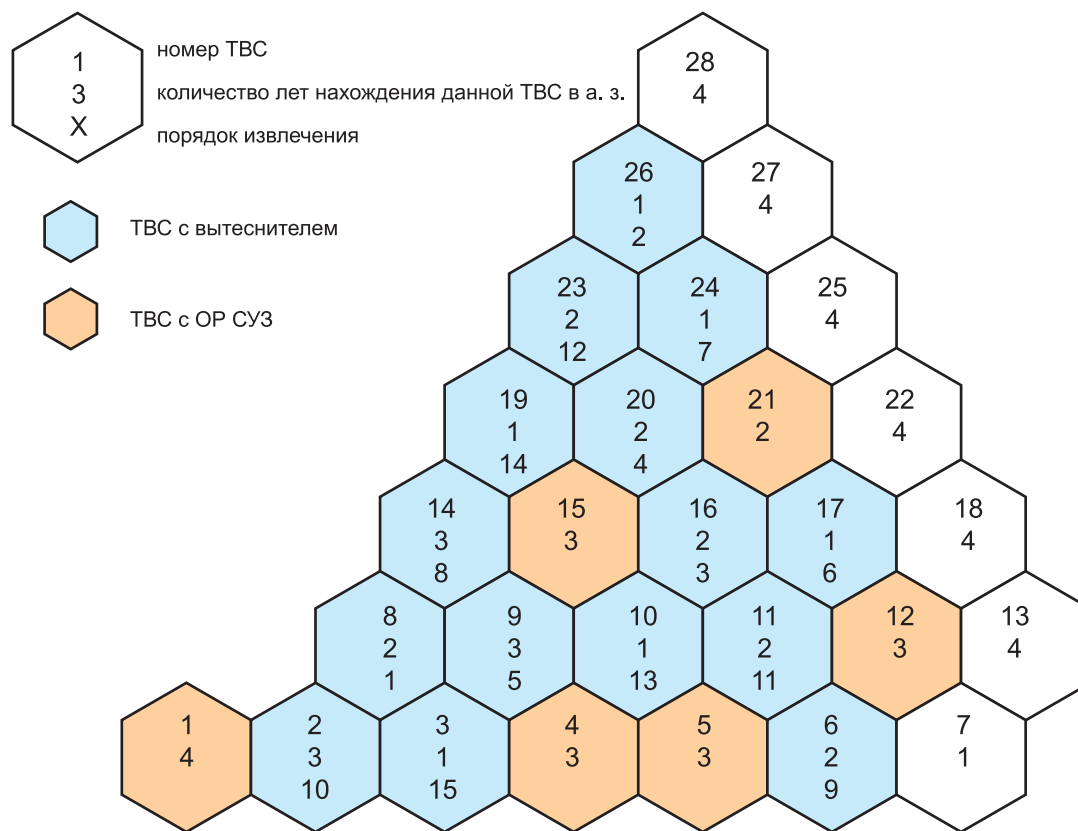


Рис. 4. Картограмма активной зоны ВВЭР-1000 со спектральным регулированием

В таблице 1 представлены основные сравнительные характеристики топливных циклов РУ ВВЭР-1000 без спектрального регулирования и с регулированием спектра нейтронов

Таблица 1. Основные нейтронно-физические характеристики РУ ВВЭР-1000

Характеристика	ВВЭР-1000	ВВЭР-1000 спектральное регулирование UOX	ВВЭР-1000 спектральное регулирование MOX
Продолжительность работы стационарной загрузки, сут.	294	351	354
Обогащение в твэлах (вытеснителях), % вес	4.12	4.12 (0.2)	11.5
Полная загрузка в а. з. (масса вытеснителей), т т. м.	70.6 (0)	70.6 (31.0)	70.6 (0)
Ежегодная загрузка ^{235}U + ^{239}Pu + ^{241}Pu , кг	750	750 (16.0)	1371.5
Среднее выгорание твэлов (вытеснителей), МВт•сут/Т. м.	48.5	55.0 (5.6)	58.4
*КН	0.39	0.46	0.70
**КВ	0.54	0.65	0.75
Удельный расход природного урана, т/ГВт (э) в год, при $X_{\text{отв}} = 0.1\%$	156	137	—

* коэффициент накопления (КН), определяется как отношение массы выгружаемого делящегося материала к массе загружаемого делящегося материала;

** коэффициент воспроизводства (КВ), определяется как отношение массы произведенного топлива к массе сгоревшего топлива.

Представленные результаты показали, что спектральное регулирование для уранового варианта позволило поднять среднее выгорание выгружаемого обогащенного топлива более чем на 13 %. Для варианта ВВЭР-1000 со спектральным регулированием и с МОКС-топливом можно отметить значительное увеличение как КН – до 0.70, так и КВ – до 0.75. Следует отметить, что полученные нейтронно-физические характеристики по своим значениям близки к заявленным требованиям, которые сформулированы на основе сценарного анализа развития системы атомной энергетики.

Переходный этап и этап замкнутого топливного цикла

В системе атомной энергетики пока нет эффективных конвертеров тория в уран-233 и урана-238 в плутоний. Поэтому становится актуальным замыкание ядерного топливного цикла по урану и плутонию для реакторов типа ВВЭР, что позволяет, не прибегая к их принципиальной реконструкции, улучшить топливоиспользование в них на 20 – 25%. Что, конечно, потребует в свою очередь создания технологий переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) с временем внешнего топливного цикла 3 – 5 лет. Это частично противоречит наметившейся тенденции увеличения средней глубины выгорания с соответствующим увеличением времени выдержки ОЯТ на АЭС перед его транспортировкой на предприятия по переработке ОЯТ и требованиям к ним.

В этой связи целесообразно рассмотреть и подготовить пути кардинального улучшения топливоиспользования с помощью реакторов легководного направления, т. е. необходимо переходить в них самих от сжигания урана-235 к потреблению урана-238 и/или тория-232 как энергоресурсов.

Для решения этих задач в 2009 году в НИЦ «Курчатовский институт» совместно с ОАО «ОКБ «ГИДРОПРЕСС» и ОАО «Атомэнергопроект» была начата научно-исследовательская работа (НИР) по разработке предложений по проекту АЭС с «СУПЕР-ВВЭР».

В процессе планируемого развития «СУПЕР-ВВЭР» с модернизацией традиционной технологии ВВЭР рекомендуется достижение следующего набора конкретных целей и задач:

- возможность работы в замкнутом топливном цикле с $KB \sim (0,80 - 0,85)$;
- расход природного урана в открытом топливном цикле — 130 – 135 т/ГВт (э) в год;
- максимальное уменьшение количества поглотителей в активной зоне в процессе выгорания;
- промышленное производство модулей энергоблока и сокращение времени сооружения до 3,5 – 4 лет;
- обеспечение широких эксплуатационных возможностей (маневрирование, топливные циклы до 24 месяцев и КИУМ более 90%).

Основным методом для решения поставленных задач был выбран метод регулирования спектра нейтронов в активной зоне ВВЭР в процессе его работы.

Исследования по анализу возможности улучшения топливоиспользования и увеличения достигаемой глубины выгорания топлива путем регулирования спектра нейтронного потока в легководных реакторах проводятся относительно давно. Основная идея спектрального регулирования базируется на ужесточении спектра нейтронов в начале кампании реактора с целью увеличения накопления плутония и последующего смягчения спектра в активной зоне к концу кампании реактора. Способы такого регулирования рассматриваются разные: от варьирования плотности теплоносителя в процессе работы реактора, до изменения водо-уранового отношения с помощью вытеснителей.

В настоящей работе рассматривается спектральное регулирование, осуществляемое с помощью вытеснителей, содержащих обедненный уран. В специально спроектированных ТВС предусмотрены направляющие каналы, в которых

размещаются вытеснители с обедненным ураном. В начале работы реактора, активная зона которого набрана из таких ТВС, все вытеснители находятся в активной зоне. Причем количество вытеснителей выбрано таким образом, что реактор находится в критическом положении. Спектральное регулирование совмещает функции регулирования реактивности в процессе выгорания топлива. Последовательное извлечение вытеснителей из обедненного урана позволяет компенсировать потерю реактивности во время работы реактора. При этом твэги и жидкостное борное регулирование в процессе работы реактора не используются. В определенном количестве ТВС, в которых предусмотрено размещение органа регулирования системы управления и защиты (ОРСУЗ), вытеснители отсутствуют.

Ниже представлены результаты расчетных исследований нейтронно-физических характеристик и характеристик топливных циклов реакторных установок (РУ) ВВЭР-1000 со штатными ТВС и жидкостным борным регулированием процесса выгорания, РУ ВВЭР-1000 с урановым топливом и спектральным регулированием и РУ ВВЭР-1000 с МОКС-топливом и спектральным регулированием с 4-годовой кампанией топлива (42 свежих ТВС ежегодно загружаются в активную зону). Для всех вариантов рассматривается активная зона с пониженной утечкой нейтронов — в периферийном ряду располагаются ТВС последнего года эксплуатации.

На рис. 3 (стр. 26) представлена картограмма модернизированной ТВС ВВЭР-1000, предназначенной работать в режиме спектрального регулирования.

Основные характеристики модернизированной ТВС и твэлов:

- топливная таблетка диаметром 5.65 мм без центрального отверстия;
- оболочка твэла толщиной 0.5 мм;
- твэл с внешним диаметром 6.8 мм;
- обогащение топлива 4.12%;
- длина твэла в холодном состоянии 3530 мм;
- формоустойчивый циркониевый каркас ТВС;
- интегрированный с топливом гадолиниевый выгорающий поглотитель отсутствует;
- количество твэлов в ТВС 546 шт.;
- 25 каналов для вытеснителей.

Диапазон изменения водо-уранового отношения при опущенных и извлеченных вытеснителях меняется от 1 до 1.96.

На рис. 4 (стр. 28) представлена картограмма активной зоны ВВЭР-1000. 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 из обедненного урана (последовательность извлечения из активной зоны показана на рис. 4) позволяет компенсировать потерю реактивности во время работы реактора, при этом жидкостное борное регулирование не используется. Следует отметить, что для варианта активной зоны с МОКС-топливом используются циркониевые вытеснители вместо обедненного урана. Их «веса» достаточно для компенсации избыточной реактивности. РЭА