

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шкала** сейсмической интенсивности MSK. MSK-64. М., 1964.

2. **Нормы** проектирования сейсмостойких атомных станций. НП-031—01. М., 2001.

3. **Нормы** расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭГ-7-002—86. М., 1989.

УДК 621.039.524.2.034.44-97

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ТВС РБМК-1000 ПЕРВОЙ ОЧЕРЕДИ ПОСЛЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕСУРСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

*Черепнин Ю.С., Слободчиков А.В., Иванов А.В., Дмитриева И.А., Запорожец М.В., Арцыбашев А.А.
(АО «НИКИЭТ», г. Москва)*

На энергоблоках РБМК-1000 первой очереди (первые два энергоблока Ленинградской и Курской АЭС) зафиксировано развитие процессов деградации графитовой кладки и элементов активной зоны, в том числе искривление технологических каналов [1, 2]. Для уменьшения накопленных деформаций и снижения скорости их развития в 2012—2016 гг. были проведены технические и технологические мероприятия, включающие, в частности, контроль фактического состояния технологических каналов и колонн графитовой кладки, продольную резку графитовых блоков на две или четыре части, замену технологических каналов, силовое воздействие натяжителями на графитовые блоки. Также была обоснована и проанализирована работоспособность ТВС энергоблоков с восстановленными ресурсными характеристиками, включающая:

анализ прохождения операций загрузки-выгрузки ТВС в искривленных технологических каналах;

аналитическую и экспериментальную оценки взаимосвязи степени и профиля искривления технологических каналов с размером зазора между твэлами наружного ряда и внутренней поверхностью канальной трубы;

анализ условий эксплуатации ТВС в технологических каналах как измененной (искривленные каналы), так и восстановленной геометрии, в том числе отремонтированных ячеек активной зоны;

анализ фактического состояния ТВС, зафиксированного при осмотре во время плановых ремонтов.

Серийно изготавливаемая (штатная) ТВС РБМК-1000 представляет собой конструкцию, в которой на несущий элемент — центральный стержень со штангой или несущую трубу последовательно установлены до упора в переходник

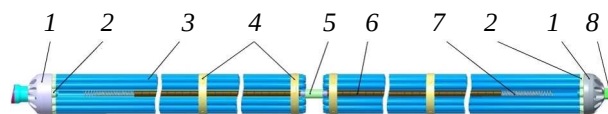
верхний хвостовик, верхний пучок твэлов, центральная втулка, нижний пучок твэлов и нижний хвостовик, затем поджаты гайкой, устанавливаемой на резьбу в нижней части центрального стержня (несущей трубы) (рис. 1) [3]. Затяжка гайки регламентируется, и по окончании сборки она фиксируется от поворота штифтом. Максимальный наружный диаметр ТВС, измеряемый по диаметру описанной окружности дистанционирующих решеток, составляет $79_{-0,4}^{+0,4}$ мм. Максимальная длина ТВС 10 033 мм. Между торцами твэлов верхнего и нижнего пучков предусмотрен зазор 30_{-5}^{+4} мм для компенсации их удлинения при эксплуатации.

Конструкция верхнего и нижнего пучка твэлов идентична. Пучок твэлов состоит из каркаса, 18 твэлов и 18 обжимных колец. Каркас собирается из каркасной трубы, концевой решетки и 10 дистанционирующих решеток.

При анализе прохождения операций загрузки-выгрузки ТВС в искривленных технологических каналах рассмотрены результаты:

испытаний полномасштабных массогабаритных макетов ТВС РБМК-1000, -1500 штатной и перспективной (с центральным креплением твэлов ТВС-Ц) конструкции, выполнявшихся в 1986—1998 гг. в ЦКБМ на теплогидромеханическом стенде;

испытаний полномасштабного массогабаритного макета ТВС РБМК-1000 на стенде технологического канала 3-го энергоблока Ленинградской АЭС в 2011—2013 гг.;



Р и с. 1. Общий вид ТВС РБМК-1000 штатной конструкции: 1 — хвостовик; 2 — концевая решетка; 3 — твэл; 4 — дистанционирующая решетка; 5 — втулка; 6 — топливная таблетка; 7 — фиксатор; 8 — гайка

анализа диаграмм усилий выгрузки ТВС при плановых ремонтах 2011—2012 гг. на первых двух энергоблоках Ленинградской АЭС;

исследований состояния топливных сердечников полномасштабных ТВЭЛов РБМК-1000 при их изгибе.

Испытания на теплогидромеханическом стенде ЦКБМ проводили как на прямом, так и искривленном экспериментальном технологическом канале. Максимальная стрела прогиба искривленного экспериментального технологического канала составила 40 мм и по координате соответствовала верхней части верхнего пучка ТВЭЛов макета ТВС. Испытания на загрузку-выгрузку на стенде не выявили отличий в поведении макетов ТВС штатной конструкции и ТВС-Ц, а также в состоянии их элементов, зафиксированном по окончании испытаний.

Испытания на загрузку-выгрузку на стенде технологического канала 3-го энергоблока Ленинградской АЭС выполняли с применением полномасштабного массогабаритного макета серийно изготавливаемой ТВС РБМК-1000 (в составе топливного модуля) при 10 разных схемах раскрепления и нагружения имитатора технологического канала, моделирующих гипотетические профили искривления. При каждой схеме нагружения выполнялось по два цикла испытаний. Испытаниями установлено:

при всех реализованных профилях искривления и прогибах макет топливного модуля проходил в имитатор технологического канала под собственным весом;

на наружных поверхностях ТВЭЛов макета ТВС отсутствовали следы контакта (потертости, царапины и др.) с внутренней поверхностью имитатора технологического канала;

механические повреждения (задиры, забоины, смятия) элементов конструкции макета топливного модуля (подвески и макета ТВС) отсутствовали;

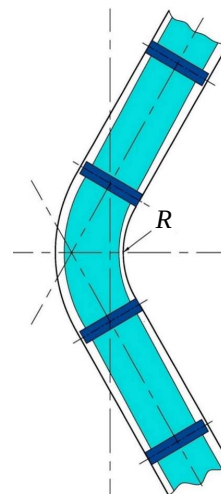
при искривлении имитатора технологического канала в одной плоскости до максимального прогиба на высотной координате основной подвижной опоры, равного 200 мм включительно, сохранялась возможность проворота макета топливного модуля вручную;

при искривлении имитатора технологического канала в двух взаимно перпендикулярных плоскостях возможность проворота макета топливного модуля вручную сохранялась до максимального прогиба 150 мм на одной из подвижных опор.

Анализ диаграмм системы контроля сил разгрузочно-загрузочной машины первых двух энергоблоков Ленинградской АЭС не выявил зависимости усилий при выгрузке ТВС из технологических каналов от стрелы прогиба. Усилия лежали в диапазоне от 155 до 185 кгс (при среднем 170 кгс).

Для оценки влияния искривления технологических каналов на целостность топливных таблеток было отобрано 30 необлученных ТВЭЛов РБМК-1000, изготовленных ОАО «МСЗ» по штатной технологии. Каждый ТВЭЛ подвергался прогибу в горизонтальной плоскости с точкой приложения изгибающего усилия в середине топливного сердечника на 50, 100 и 150 мм. Для оценки состояния топливных сердечников все ТВЭЛы подвергали рентгенографическому контролю в исходном и изогнутом состоянии, а также после снятия изгибающей нагрузки. Исследования показали, что в топливных сердечниках ТВЭЛов не обнаружено новых дефектов таблеток (трещин, сколов и крошек). Искривление ТВЭЛов, изготовленных по штатной технологии, до прогиба 150 мм не приводит к нарушению целостности топливных сердечников и разрушению таблеток.

При искривлении технологических каналов наиболее опасным с точки зрения уменьшения и исчерпания зазора между ТВЭлом наружного ряда и внутренней поверхностью канальной трубы является участок длиной 360 мм между соседними дистанционирующими решетками (рис. 2). Как показала аналитическая оценка, в зависимости от радиуса кривизны оси технологического канала (11,3, 32, 37, 63 м на локальном участке) в предположении, что на участке между



Р и с. 2. Модель взаимодействия ТВС с технологическим каналом (R — радиус кривизны оси технологического канала на локальном участке)

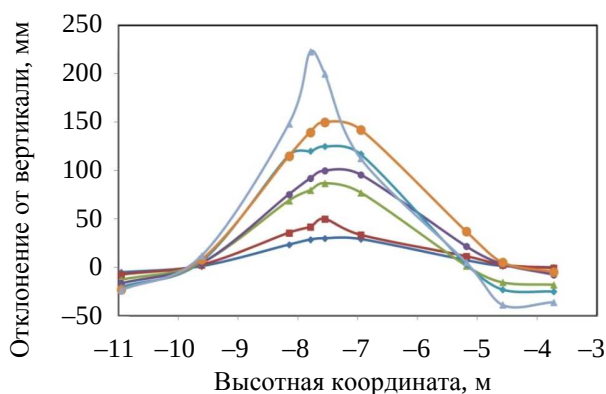
дистанционирующими решетками твэлы сохраняют прямолинейность, минимальный зазор между твэлом наружного ряда и внутренней поверхностью канальной трубы составляет 0, 0,929, 1, 1,178 мм соответственно.

На стенде технологического канала 3-го энергоблока Ленинградской АЭС была разработана схема измерения зазора между твэлами наружного ряда и внутренней поверхностью канальной трубы ультразвуковым методом на заполненном водой имитаторе технологического канала. Измерения выполняли в сечениях, соответствовавших середине расстояния между соседними дистанционирующими решетками макета ТВС, с шагом 720 мм. Таким образом определяли зазор через каждые две дистанционирующие решетки макета ТВС. Для каждого профиля искривления имитатора технологического канала контролировали и фиксировали отклонение имитатора от исходного положения (на восьми высотных координатах) и зазор между твэлами наружного ряда и внутренней поверхностью канальной трубы по периметру имитатора в девяти сечениях по высоте (рис. 3, 4).

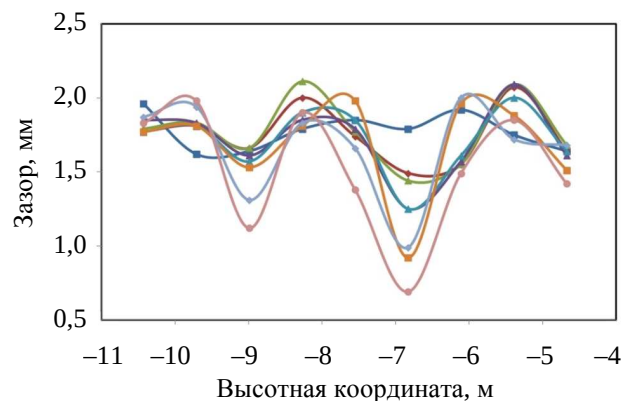
Исследованиями установлено:

в диапазоне максимальной стрелы прогиба до 100 мм минимальный зазор между твэлами наружного ряда и внутренней поверхностью канальной трубы систематически превышал 1 мм. Наименьший минимальный зазор 1,25 мм зафиксирован на высотной координате $-6,83$ м (отсчет от верха имитатора технологического канала);

при максимальной стреле прогиба 125, 150 и 200 мм минимальный зазор между твэлами наружного ряда и внутренней поверхностью канальной трубы также фиксировался на высотной



Р и с. 3. Измеренный профиль искривления имитатора технологического канала 30 (♦), 50 (■), 87 (▲), 100 (●), 125 (◆), 150 (○), 200 мм (▲)

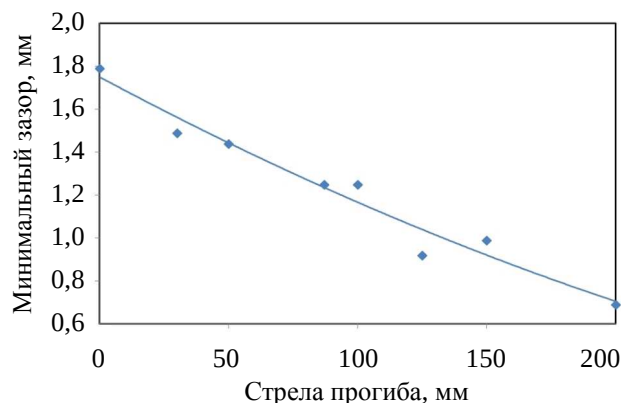


Р и с. 4. Минимальный зазор между твэлами наружного ряда и внутренней поверхностью канальной трубы исходный (■), 30 (♦), 50 (▲), 87 (▲), 100 (▲), 125 (■), 150 (◆), 200 мм (●)

координате $-6,83$ м (отсчет от верха имитатора технологического канала) и составил 0,92, 0,99, 0,69 мм соответственно.

На рис. 5 видно, что зависимость минимального зазора между твэлами наружного ряда ТВС и внутренней поверхностью канальной трубы от стрелы прогиба имитатора технологического канала носит монотонный характер и описывается законом, близким к линейному.

Необходимо отметить, что уменьшение минимального зазора между твэлами наружного ряда и внутренней поверхностью канальной трубы до 0,69 мм при профилях искривления, которые характеризуются стрелой прогиба, превышающей 125 мм, обусловлено, помимо собственно искривления имитатора технологического канала, овализацией трубы и малым радиусом кривизны на участках контакта с опорами стенда вследствие примененного способа нагружения (точечное приложение изгибающих нагрузок). При этом с увеличением прогиба возрастает овальность имитатора технологического канала. Для реальных условий нагружения тех-



Р и с. 5. Зависимость минимального зазора от максимальной стрелы прогиба имитатора технологического канала

нологических каналов реактора блоками графитовой кладки (распределенная нагрузка) при аналогичных профилях искривления канальной трубы минимальный зазор будет больше. Таким образом, оценка работоспособности ТВС на основе результатов, полученных на стенде технологического канала 3-го энергоблока Ленинградской АЭС, является заведомо консервативной.

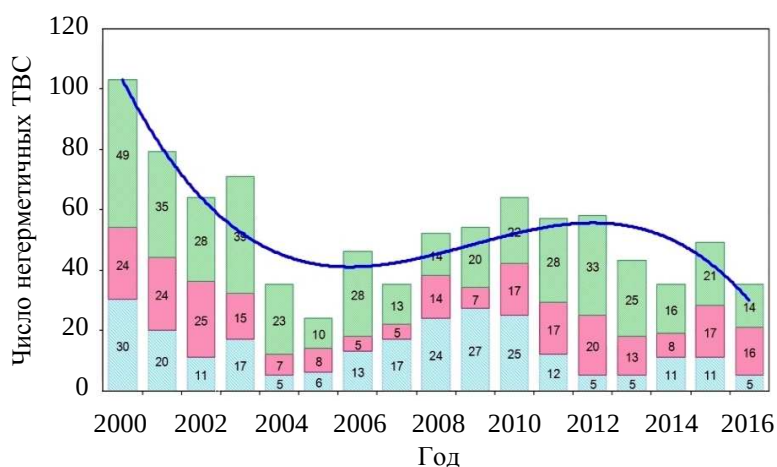
Сравнительный анализ условий эксплуатации ТВС в технологических каналах как измененной, так и восстановленной геометрии, в том числе и отремонтированных ячеек активной зоны не выявил негативного влияния на надежность эксплуатации ТВС фактического состояния колонн графитовой кладки (числа и ширины резов), а также изменения геометрических характеристик (степени искривления и максимального внутреннего диаметра) технологических каналов. Количественные различия эксплуатационных параметров обусловлены энерговыработкой ТВС и расположением технологических каналов в активной зоне. Вне зависимости от степени искривления технологических каналов, числа и ширины резов ячеек эксплуатационные параметры находились в пределах, установленных требованиями технических условий на ТВС и технологическим регламентом по эксплуатации АЭС.

Ячейки технологических каналов энергоблоков РБМК-1000 первой очереди, из которых выгружали негерметичные ТВС в 2012—2016 гг., по активной зоне распределены равномерно, их стрела прогиба находится в широком диапазоне значений. Так, в 2016 г. на 2-м энергоблоке Курской АЭС стрела прогиба технологических каналов, из которых выгружены негерметичные ТВС, и их ближайшего окружения составляла 17—80 мм, при этом большая часть (~52%) — до 50 мм. Стрела прогиба технологических каналов первых двух энергоблоков Ленинградской и 1-го энергоблока Курской АЭС находилась в более узком диапазоне: 30—64, 30—66 и 23—67 мм соответственно. Таким образом, общий диапазон стрелы прогиба на РБМК первой очереди составил 17—80 мм, т.е. формоизменение графитовой кладки и, как следствие, искривление технологических каналов не влияют на выход из строя ТВС по причине негерметичности.

Как видно на рис. 6, в 2012—2016 гг. (эксплуатация энергоблоков РБМК-1000 первой очереди в условиях формоизменения графитовой кладки) число отказов по негерметичности на АЭС с РБМК по годам составило 35—58, тогда как в 2000—2004 гг. (до обнаружения формоизменения графитовых кладок) — 35—103. Уменьшение числа негерметичных ТВС связано в том числе с переходом на уран-орбитовое топливо.

Во время ремонта 2012—2016 гг. в приреакторных бассейнах выдержки энергоблоков РБМК-1000 первой очереди было осмотрено ~1140 ТВС, выгруженных на промежуточное хранение. Из них 57 ТВС имели индивидуальные особенности состояния — у 45 зафиксированы механические повреждения дистанционирующих решеток, на 12 обнаружены инородные частицы, для четырех характерна разновысотность твэлов, у одной ТВС зафиксировано изменение цвета оболочки твэла на локальном участке, состояние оболочек твэлов еще одной ТВС характеризовалось нетипичным внешним видом. При анализе результатов осмотра ТВС не обнаружено отличий в характере повреждений, зафиксированных после эксплуатации ТВС в деформированных технологических каналах до восстановления ресурсных характеристик графитовой кладки, а также в технологических каналах ячеек, подвергшихся при восстановительном ремонте операциям резки графитовых блоков.

Следует отметить, что отказы ТВС по причине негерметичности и наличия дефектов, препятствующих их дальнейшей эксплуатации, не привели к останову блока, облучению персо-



Р и с. 6. Число негерметичных ТВС, выгруженных в 2000—2016 гг. на Ленинградской (■), Смоленской (■), Курской (■) и всех АЭС с РБМК-1000 (—)

нала и выходу радионуклидов в окружающую среду.

Таким образом, работоспособность ТВС РБМК-1000 штатной и перспективной ТВС-Ц конструкций в условиях формоизменения графитовых кладок обеспечивается до достижения технологическими каналами стрелы прогиба до 120 мм. Однако ТВС-Ц обеспечит более высокую геометрическую стабильность пучков твэлов, что показано послереакторными исследованиями ТВС опытной партии. Основное отличие ТВС-Ц заключается в том, что в районе стыка верхнего и нижнего пучков твэлов располагаются не дистанционирующие решетки, собранные из тонкостенных элементов, а опорные решетки толщиной 10 мм, изготовленные из цирконий-ниобиевого сплава Э-125 — материала, не подверженного межкристаллитному коррозионному растрескиванию под напряжением. ТВС-Ц исключает просыпание топлива в теплоноситель контура многократной принудительной циркуляции при разгерметизации твэлов типа «отрыв

заглушки», снимает ограничения на удлинение твэлов при эксплуатации и сохраняет зазор во время и после эксплуатации, что гарантирует разделку отработавшей на пучки твэлов при переводе на сухое хранение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров А.А., Черепнин Ю.С., Иванов А.В. и др. Обеспечение работоспособности ТВС РБМК-1000 на завершающем этапе эксплуатации энергоблоков. Тезисы докл. IX Межд. научно-технич. конф. «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». М., Росэнергоатом, 2014, с. 47—48.
2. Петров А.А., Черепнин Ю.С., Иванов А.В. и др. Обеспечение работоспособности ТВС РБМК-1000 на энергоблоках с восстановленными ресурсными характеристиками. Тезисы докл. научно-технич. конф. «Ядерное топливо нового поколения для АЭС». М., АО «ТВЭЛ», 2014, с. 40—41.
3. Абрамов М.А., Авдеев В.И., Адамов Е.О. и др. Канальный ядерный энергетический реактор РБМК. Под общ. ред. Ю.М. Черкашева. М., ГУП НИКИЭТ, 2006. 632 с.

Рефераты статей

Продолжение. Начало см. на 2-й с. обложки

УДК 621.039.566

Василевский В.П., Масленников А.В., Ложников И.Н. **Освоение номинальной мощности на 1-м энергоблоке Ленинградской АЭС после восстановления ресурсных характеристик графитовой кладки реактора.** — Атомная энергия, 2017, т. 123, вып. 5, с. 270—275.

Приведена максимальная температура графита при повышении мощности реактора 1-го энергоблока Ленинградской АЭС до 80% номинальной в ноябре—декабре 2013 г. после восстановления ресурсных характеристик графитовой кладки. Выполнен сравнительный анализ температурного режима графитовой кладки реактора на мощности 80 и 100% номинальной до и после восстановления ресурсных характеристик при номинальном содержании гелия в газовой смеси, продуваемой через реакторное пространство. В статье проведено сравнение максимальной температуры графитовой кладки реакторов 1-го энергоблока Ленинградской и 2-го энергоблока Курской АЭС при пуске и освоении мощности после восстановления ресурсных характеристик. Рассмотрено влияние восстановления ресурсных характеристик на теплогидравлический режим технологических каналов реактора. Рис. 4, табл. 5.

УДК 621.039.531

Штромбах Я.И., Платонов П.А., Чугунов О.К., Кулешов Д.А., Маневский В.Н., Алексеев В.М., Смородкин Е.И. **Работоспособность графита на завершающем этапе эксплуатации**

РБМК. — Атомная энергия, 2017, т. 123, вып. 5, с. 276—280.

Для оценки работоспособности и возможности prolongации ресурса графитовой кладки РБМК на завершающем этапе эксплуатации разработаны методика оценки технического состояния и остаточного ресурса графитовой кладки РБМК-1000 и программа исследований. Определены критерии работоспособности графитовой кладки, периодичность и методы их контроля, которые в сочетании с прогнозными расчетами позволили обосновать возможность безопасной эксплуатации графитовой кладки РБМК-1000 сверх назначенного срока. Рис. 6, табл. 1, список лит. 13 назв.

УДК 621.039.531

Тутнов А.А., Киселев А.С., Киселев А.С., Кругляк Е.С. **Численное моделирование формоизменения графитовой кладки РБМК-1000.** — Атомная энергия, 2017, т. 123, вып. 5, с. 280—285.

Приводится описание инженерной и детальной трехмерной моделей графитовой кладки РБМК-1000 для моделирования ее формоизменения, обусловленного появлением в блоках продольных трещин вследствие неравномерности распределения температуры и флюенса. По мере накопления флюенса нейтронов и достижения предельного прогиба графитовых колонн выполняется ремонт кладки путем резки графитовых блоков. Разработанные модели дают возможность оценить накопление прогиба колонн до и после ремонта и эффективность различных схем ремонта. С применением разработанных моделей рассчитан максимальный прогиб колонн кладки 1-го энергоблока Ленин-