

ОПЫТ ПРОДЛЕНИЯ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ БОР-60 - ЗАЛОГ РАЗВИТИЯ “БЫСТРЫХ НАТРИЕВЫХ” ТЕХНОЛОГИЙ

М.Д. Лякишева, С.Л. Лякишев, В.М. Махин, В.П. Семишкин

Введение

Создание АЭС с реакторами на быстрых нейтронах позволяет смягчить в перспективе проблему обеспечения топливом атомной энергетики. В настоящее время в России и за рубежом наиболее освоенными являются реакторные установки с натриевым теплоносителем – РУ БН.

Последовательность проведения в России НИОКР в обоснование установок данного типа и их сооружения, а также полученный опыт эксплуатации уникальны:

БР-1 (1954) → БР-2 (1956) → БР-5 (1959) → БОР-60 (1969) → БР-10 (1973) → БН-350 (1973) → БН-600 (1980) → БН-800 (2016) → БН-1200 (технический проект) → МБИР (технический проект и сооружение в настоящий момент).

В ОКБ “ГИДРОПРЕСС” были разработаны РУ БОР-60 и парогенераторы для этой и всех последующих установок, а также парогенератор (ПГ) для установки CEFR в КНР.

В настоящий момент реакторная установка БОР-60 является ядерной установкой на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, это прототип АЭС (мощность генерации электрической энергии 12 МВт, тепловая мощность – 60 МВт). Физический пуск состоялся 30.12.1968, энергетический пуск на воздушный теплообменник – 28.12.1969. Комплекс подключен к энергосистеме 28.12.1970г.

Для обеспечения компактности активной зоны и реактора в целом при высоких удельных тепловых нагрузках твэлов обогащение урана было принято равным 90%. При этих условиях максимальный нейтронный поток оценивался значением $(3-3,5) \cdot 10^{15}$ нейтр/см² с при тепловой мощности реактора 60 МВт (в настоящее время $3,7 \cdot 10^{15}$ нейтр/см² с). Использование высокообогащенного урана обусловило малый размер активной зоны и жесткий спектр нейтронов.

Исторические подробности

Для обоснования основных технологических и конструкторских решений по энергетическим реакторам на быстрых нейтронах академик А.И. Лейпунский и О.Д. Казачковский (ФЭИ) разработали предложение о строительстве экспериментального реактора БОР-60.

ОКБ “ГИДРОПРЕСС” получило задание на разработку этого реактора в 1963 году. На начало разработки был создан ряд установок БР малой мощности, и Научный Руководитель – ФЭИ имел определенный опыт создания и эксплуатации установок с натриевым теплоносителем, которого не было у конструкторской организации – ОКБ “ГИДРОПРЕСС”.

Используя скудные литературные данные и опыт, полученный на БР-5, в ОКБ “ГИДРОПРЕСС” за 3 года было разработано несколько вариантов проектов реактора, пройдя этапы от БР-40 и места расположения в г. Обнинске до БОР-60 в г. Мелекесе (решение принято в 1964г. Советом Министров СССР). За это же время на предприятии был создан натриевый стенд Н-3000 и проведены испытания (на натрии или воде) моделей всех важнейших узлов реактора и контуров: пакетов активной зоны, механизмов СУЗ, поворотных пробок, напорного коллектора, перегрузочного узла, холодных ловушек, многотрубных моделей парогенератора и др. “Пакетами” назывались кассеты или ТВС.

Была разработана рабочая документация реактора, совместно с ЦНИИ КМ “Прометей”, ФЭИ и НИИАР были выбраны конструкционные материалы, выполнены теплогидравлические и прочностные расчеты.

В 1965 году началось изготовление основных узлов реактора, и в этом же году началось строительство здания реакторной установки.

В 1968 году корпус реактора был установлен в его шахте, а в декабре того же года с использованием изготовленных к тому времени кассет был проведен 30 декабря 1968г. физический пуск (без заполнения корпуса натрием), имеющий немаловажное значение для энергетического пуска реактора в 1969 году (28.12.1969).

Уже в следующем 1970 году был включен в работу парогенератор конструкции ОКБ “ГИДРОПРЕСС”, и с тех пор на исследовательском ядерном реакторе (ИЯР) БОР-60 было проведено множество работ, имеющих важнейшее значение для разработки, пуска и эксплуатации БН-350 и БН-600, для развития различных направлений реакторной науки и техники. Следует сказать, что характеристики, параметры и экспериментально-исследовательские возможности БОР-60 не уступали, а в ряде случаев превосходили аналогичные показатели зарубежных опытных реакторов на быстрых нейтронах. Определенным этапом в развитии направления БН-реакторов были испытания на РУ БОР-60 прототипа парогенератора для АЭС с РУ БН-600.

Разработка реактора велась под руководством С.М. Благоволина. Основные участники проекта и этапы разработки названы в юбилейной книге. Одним из создателей БОР-60 был Б.И. Лукасевич, который на протяжении всей своей долгой трудовой деятельности обращал внимание на свое “детище”.

Сегодня реакторная установка БОР-60 - самый долгоживущий исследовательский реактор на быстрых нейтронах, переживший подобные реакторы: EBR-2, Rapsodie, DOUNREAY и др.

В этом заслуга, как специалистов разработчиков проекта ОКБ “ГИДРОПРЕСС”, так и ученых и специалистов многих предприятий и организаций, работавших над созданием БОР-60, и, особенно, эксплуатирующих эту установку ГНЦ НИИАР.

О первом продлении срока эксплуатации ИЯУ БОР-60

Назначенный проектный срок службы реактора и элементов РУ составлял 20 лет и истекал в 1989г. ОКБ “ГИДРОПРЕСС” в 1986г приступило к вопросу “продления ресурса”, так это называлось в то время. К этому времени вышли проекты норм и правил в атомной энергетике, которые распространялись на установки с температурой теплоносителя до 600°C.

Работы по продлению срока эксплуатации БОР-60 включали следующее:

- проведение анализа фактических условий эксплуатации и количества режимов;
- получение дополнительных данных по физико-механическим свойствам материалов;
- оптимизация условий эксплуатации незаменимого оборудования в стационарных и переходных режимах работы;
- выполнение расчетов на прочность критических элементов на прогнозируемый период эксплуатации на основании новых нормативных данных и требований.

В обоснование решения о продлении срока эксплуатации на 10 лет, т.е. до 1999г конструкторской бригадой под руководством Лихошерста А.Н. было выполнено около сорока расчетов, включающих расчеты элементов реактора, трубопроводов I и II контура, сильфонных компенсаторов трубопроводов, воздушного теплообменника, буферной емкости, дренажных баков, корпуса циркуляционного натриевого насоса, промежуточного теплообменника. В расчетах были в основном использованы аттестованные впоследствии программы, разработанные в ОКБ “ГИДРОПРЕСС” для ПЭВМ.

Впоследствии, проводились ежегодные комиссии по контролю мероприятий в подтверждение продленного срока эксплуатации. В составе комиссии ОКБ “ГИДРОПРЕСС” представлял Долотов Ю.С.

О втором продлении срока эксплуатации ИЯУ БОР-60

В расчетах на прочность элементов РУ во время первого продления срока эксплуатации использовались свойства конструкционного материала, полученные линейной экстраполяцией в логарифмических координатах до 300000ч.

Головной материаловедческой организацией ЦНИИ КМ “Прометей” были выданы значения длительных свойств конструкционных материалов на время 300000ч. Совместно с НИИАР был проведен анализ фактических условий эксплуатации и количества режимов. Это позволило подтвердить результаты ранее выполненных расчетов для элементов РУ.

Поэтому при обосновании решения о продлении срока эксплуатации до 2009г. в ОКБ “Гидропресс” группой Лякишевой М.Д. были выполнены только расчеты критических элементов реактора и сильфонного компенсатора с учетом фактического и прогнозируемого количества режимов и влияния облучения.

Была доработана и аттестована программа РЕСУРС86-2002 (авторы Л.Е. Огорев, М.Д. Лякишева, А.М. Рогов, А.А. Чернышев) расчета на циклическую и длительную циклическую прочность по методике Норм расчета на прочность... (аттестационный паспорт № 174 от 16.03.2004), учитывающая влияние облучения, натрия, времени эксплуатации свыше 200000 ч. Срок действия аттестационного паспорта программы РЕСУРС86-2002 впоследствии продлен надзором до 16.03.2024.

Влияние натрия и аргона реакторной чистоты при расчетах длительной циклической прочности учитывается путем изменения допускаемого числа циклов нагружения. За допускаемое число циклов принимается минимальное из двух значений:

- число циклов $[N_0]_{Na} = \chi_{Na} \cdot [N_0]$;

- число циклов по расчетной кривой усталости для амплитуды приведенного условного упругого напряжения $(\sigma_{aF})_в / \varphi_{Na}$.

Суммарная повреждаемость, например, в корпусе в зоне максимального уровня натрия:

- без учета влияния: $A=1,025$;

- с учетом влияния: $A=0,810$.

Влияние нейтронного облучения также учитывалось изменением допускаемого числа циклов. За допускаемое число циклов принимается минимальное из двух значений:

- число циклов $[N_0]_{F} = [N_0] / \chi_F$

- число циклов по расчетной кривой усталости для амплитуды приведенного условного упругого напряжения $(\sigma_{aF})_в / \varphi_F$.

Суммарная повреждаемость, например, в выходном патрубке:

- без учета влияния облучения: $A=0,268$;

- с учетом влияния облучения: $A=1,087$;

- с учетом совместного влияния облучения и контакта с натрием: $A=0,473$.

В расчете сильфонного компенсатора трубопроводов II-го контура была получена повреждаемость $A=6$. Сильфон был заменен на запасной, а материал был исследован. При исследовании не было обнаружено трещин, что может говорить о консервативности методики Норм расчета на прочность ПНАЭ Г-7-002-86.

Результаты расчета критических элементов реактора позволили продлить срок эксплуатации еще на 10 лет, т.е. до 2009г., уточнить подход к проблеме продления срока эксплуатации в целом, постановке и путях решения технических и исследовательских проблем, а также снятию излишнего консерватизма.

О третьем продлении срока эксплуатации ИЯУ БОР-60

В рамках Федеральной целевой программы “Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010-2015 годов и на перспективу до 2020года” было принято и в настоящее время реализуется решение о строительстве нового исследовательского реактора на быстрых нейтронах МБИР. Срок пуска МБИР планировался после 2015г. В этой связи стал актуальным вопрос об очередном продлении ресурса исследовательского реактора на быстрых нейтронах БОР-60.

По настоянию главного конструктора Трунова Н.Б. в ОКБ “Гидропресс” была проведена техническая экспертиза документов предыдущих этапов продления. В экспертизе принимали участие: Б.И. Лукаевич, В.М. Махин, В.П. Семишкин и др. Для обоснования воз-

возможности продления срока эксплуатации реактора БОР-60 на период с 2010г. по 2015г., в отделе прочности под руководством Лякишева С.Л. были выполнены расчеты на прочность в трехмерной уточненной постановке следующих критических узлов реактора:

- корпуса реактора и сварного шва в зоне уровня натрия;
- корзины реактора и сварного шва в зоне уровня натрия;
- патрубка выхода натрия.

Для выполнения указанных расчетов был проведен теплогидравлический расчет (А.А. Сошников, А.В. Дедуль), по результатам которого были уточнены граничные условия в эксплуатационных режимах. Уточнение характеристик режимов, их количества и длительных свойств материалов позволило снизить уровень накопленного длительного циклического повреждения критических узлов реактора.

Дополнительно были выявлены наиболее нагруженные (подвергающиеся неравномерному облучению) к настоящему времени элементы, которые находятся вблизи активной зоны реактора – это плиты биологической защиты малой поворотной пробки (МПП), большой поворотной пробки (БПП) и элементы их крепления (шпильки с гайками). На рисунках 1 и 2 показана конструкция реактора БОР-60 и вид на большую и малую поворотные пробки. Можно считать, что перечисленные элементы определяют возможность продления срока эксплуатации.



Оценка работоспособности проводилась в ОКБ “Гидропресс” с привлечением специалистов НИИАР (И.Ю. Жемков, Ю.М. Крашенинников и др.), ЦНИИ КМ “Прометей” (Б.З. Марголин, А.Г. Гуленко), ИЦП МАЭ (С.В. Европин, В.М. Филатов, А.Е. Обушев).

Специалистами НИИАР определены 3 характерных микрокампании, проведен нейтронно-физический расчёт, исследован материал фрагмента нижней части направляющей трубы исполнительного механизма СУЗ, расположенного в МПП, изготовленного из того же материала типа Х18Н9 и работающего в тех же условиях, что и плиты МПП со шпильками.

Были проведены варианты расчетов на прочность элементов крепления плит биологической защиты поворотных пробок (шпилек) по методике “Формулировка критерия предельного состояния работоспособности элементов крепления биологической защиты поворотных пробок реактора”, которая была разработана в ЦНИИ КМ “Прометей”. Зависимость свободного распухания материала типа Х18Н9 от температуры и флюенса, была разработана в ЦНИИ КМ “Прометей”, использовалась при продлении ресурса реактора БН-600 и рекомендована ИЦП МАЭ в “Методике обоснования целостности элементов РУ БОР-60 в связи с продлением срока службы”.

На рисунке 3 приведена часть из множества описанных в литературе зависимостей для распухания.

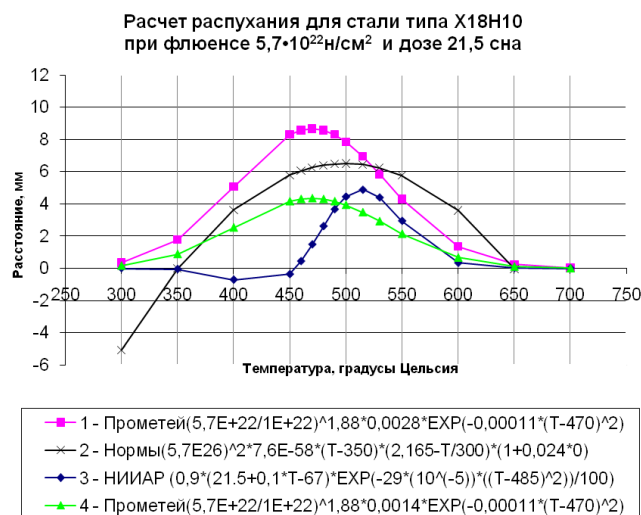


Рис.3 Расчет распухания в зависимости от температуры эксплуатации

Условия эксплуатации

Для анализа влияния эксплуатационных режимов работы на накопление повреждений элементов РУ БОР-60 весь период эксплуатации с 24.12.1969 г. по 31.12.2015 г. был разделен на семь этапов эксплуатации. Все многообразие состояний активной зоны специалистами ГНЦ НИИАР приведено к трем характерным микрокампаниям. Характеристики этапов эксплуатации приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристика этапов эксплуатации реактора БОР-60

Наименование параметра	Обозначение	Значение на этапе эксплуатации						
		1	2	3	4	5	6	7
Этап эксплуатации	-	1	2	3	4	5	6	7
Начало этапа	-	24.12.69	27.07.77	01.01.90	17.01.99	18.01.04	01.06.07	01.01.10
Конец этапа	-	10.05.77	31.12.89	01.01.99	17.01.04	11.05.07	31.12.09	31.12.15
Характерная микрокампания (МК)	-	МК-5	МК-61		МК-76			
Температура в стыке нижних концов шпилек с гайками, °С	T, T _{обл}	477	519		520			
Длительность этапа эксплуатации, ч	t	38709	66871	55890	28962	19781	15244	35230
Наработка на этапе эксплуатации, ч	Σt	38709	105580	161470	190432	210213	225457	260087

Нижние кольца БПП и нижние плиты МПП, вследствие близкого расположения к активной зоне реактора, подвержены наибольшему нейтронному облучению при высоких температурах. Под воздействием пространственного распределения флюенса нейтронов нижние кольца БПП и нижние плиты МПП распухают больше остальных колец и плит. За счет этого возникает разница перемещений между верхними и нижними концами шпилек, которая создает в шпильках медленно возрастающую со временем нагрузку.

Расчётные модели поворотных пробок

Для достоверного прогнозирования напряженно-деформированного состояния элементов БПП И МПП, изготовленных из стали 09X18H9, в расчётной модели необходимо было учесть результаты нейтронно-физического расчёта и при этом опираться на результаты измерений распухания материала, отработавшего почти 40 лет в аналогичных условиях.

Для максимального исключения консервативности расчет малой и большой поворотных пробок был выполнен с использованием метода конечных элементов и программного комплекса ANSYS. Каждая из моделей состояла из порядка 500000 узлов и 100000 20-ти узловых конечных элементов Solid95. При расчёте, учитывая симметрию большей части конструкции, использовалось половинное сечение. Поскольку в БПП и в МПП гайки прихвачены аргонодуговой сваркой к шпилькам и к кольцам (в БПП) и к плитам (в МПП) в расчете рассматривалось жесткое соединение элементов биологической защиты.

Задание нагрузок

При расчете задавались следующие нагрузки:

- постоянно действующая вес период эксплуатации масса элементов (для БПП равная 2240 кг, для МПП равная 2160 кг), которая прикладывалась как равномерно распределенная нагрузка на нижнее кольцо БПП и на нижнюю плиту МПП;
- изменяющееся при работе на различных уровнях мощности температурное поле по элементам БПП и МПП, определённое с учетом внутреннего энерговыделения в элементах, которое задается в виде распределения температуры по соответствующим элементам и представляется в виде таблиц зависимости температуры от высоты;
- медленно возрастающая со временем нагрузка из-за неравномерного радиационного распухания элементов БПП и МПП.

В соответствии с нейтронно-физическим расчётом существует неравномерность распределения флюенса как в плоскости (по радиусу), так и по высоте поворотной пробки (шпилек). Распределение флюенса по радиусу плиты описывается для каждого из 7 этапов эксплуатации полиномиальными кривыми вида

$$F=A \cdot R^2+B \cdot R+C,$$

где А, В, С – коэффициенты, R – радиус по плите от центра активной зоны, м;

Распределение флюенса по высоте для шпильки МПП Ш1 с максимальным значением флюенса для семи этапов эксплуатации описывается экспоненциальной кривой вида

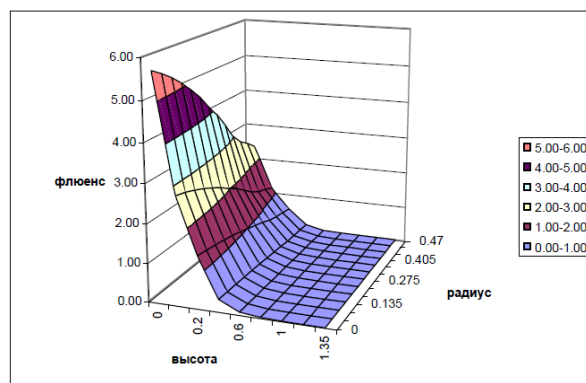
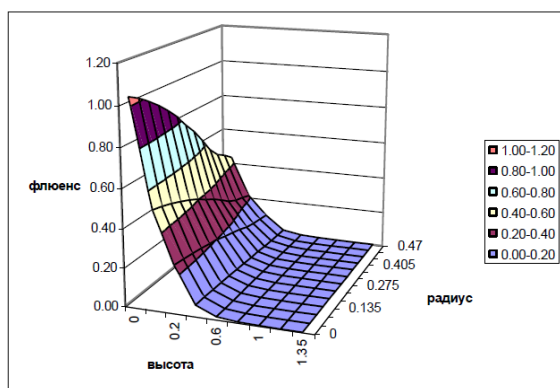
$$F=\exp(-D \cdot H),$$

где D – коэффициент,

H - высота от центра активной зоны, м.

На рисунке 4 представлены трёхмерные графики распределения величины флюенса ($F \cdot 10^{-22}$ н/см²) по высоте (H, м) конструкции и радиусу (R, м) нижней плиты МПП на начальном этапе эксплуатации 1 и прогнозируемом этапе 7. Начало координат соответствует:

- по высоте – стыку нижних концов шпилек с гайками;
- по радиусу – центру активной зоны (центру стержня СУЗ РР2).



а) распределение флюенса на этапе 1

б) распределение флюенса на этапе 7

Рис. 4 Трёхмерные графики распределения флюенса

Согласно “Методике обоснования целостности элементов РУ БОР-60 в связи с продлением срока службы”, напряжения от радиационного распухания и температурного расширения данных воздействий объединены общим термином “дилатационные”, поэтому учёт распухания проводился посредством перераспределения температуры в каждой точке расчётной схемы на величину условной температуры. Условная температура определена из условия равенства деформаций от температурного расширения и радиационного распухания:

$$\alpha \cdot T = S_0 / 3, \quad (1)$$

где S_0 – объёмное распухание, %,

α – коэффициент линейного расширения, $1/^\circ\text{C}$.

Деление на 3 введено для приравнивания значения объёмного распухания к линейному. Из формулы (1) получается зависимость условной температуры от объёмного распухания:

$$T = S_0 / (3 \cdot \alpha) \quad (2)$$

Объёмное распухание определяется по формуле:

$$S_0 = f(c, F, T_{\text{обл}}), \quad (3)$$

где F – флюенс нейтронов в рассматриваемой точке конструкции, н/см^2 ;

$T_{\text{обл}}$ – температура облучения в рассматриваемой точке конструкции, $^\circ\text{C}$;

c – коэффициент объёмного распухания, который может иметь значения от $c = 1,4 \cdot 10^{-3}$ до $c = 2,8 \cdot 10^{-3}$.

Определенная таким образом условная тепловая нагрузка задаётся при помощи APDL макроса ANSYS в каждом узле расчётной модели с учётом расстояния между центром активной зоны и центром плит.

В ОКБМ был разработан ряд модулей для ANSYS, реализующих пользовательские законы распухания и ползучести. Сравнение подходов ОКБ “ГИДРОПРЕСС” и ОКБМ на тестовом примере подтвердило адекватность примененного способа учёта распухания при определении напряженно-деформированного состояния.

На рисунке 5 показано распределение температуры по теплогидравлическому расчету и пример нагружения условной температурой узлов, расположенных в нижней плите МПП.

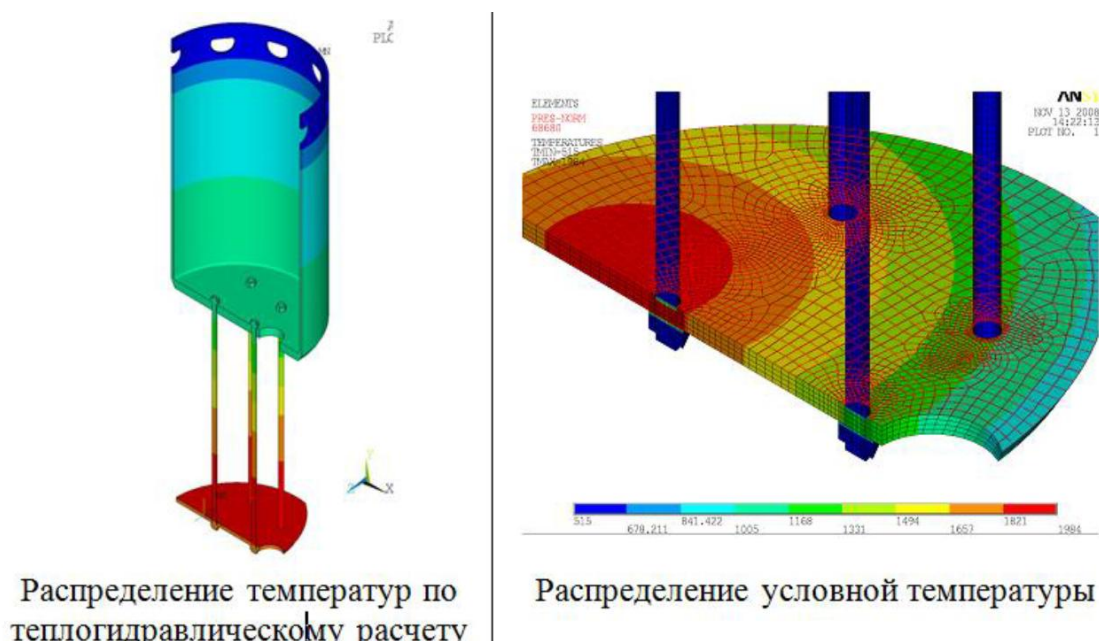


Рис. 5 Распределение температур в МПП

Вклад различных факторов нагружения показан:

- на рисунке 6 - Деформированное состояние при нагрузке от массы элементов МПП;

- на рисунке 7 - Деформированное состояние при нагрузке от совместного действия массы элементов МПП, температурного поля и радиационного распухания в конце этапа 7 эксплуатации;

- на рисунке 8 - Деформированное состояние при нагрузке от совместного действия массы элементов БПП температурного поля и радиационного распухания в конце этапа 7 эксплуатации.

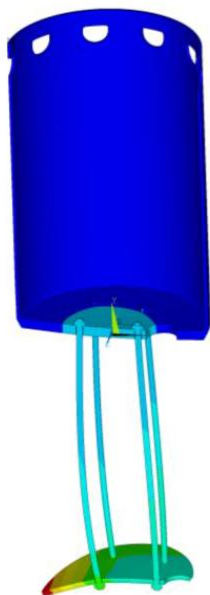


Рис. 6



Рис. 7

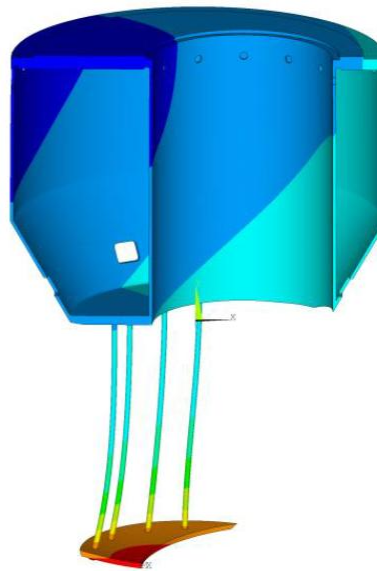


Рис. 8

В расчете рассматривались два варианта медленно возрастающей со временем нагрузки из-за неравномерного радиационного распухания элементов МПП:

- вариант 1 - радиационное распухание с использованием в формуле (3) коэффициента распухания $s=1,4 \cdot 10^{-3}$ и значений флюенса из данных НИИАР;

- вариант 2 - радиационное распухание (консервативный вариант) с использованием в формуле (3) коэффициента распухания $s=2,8 \cdot 10^{-3}$ и значений флюенса из данных НИИАР с увеличением на 20 %.

Анализ прочности

Медленно возрастающие растягивающие расчетные напряжения в резьбе шпилек (с учетом концентрации напряжений в резьбе), вызываемые совместным действием массы элементов, температурного поля и медленного радиационного распухания, не должны приводить к деформации шпилек выше предельного состояния “зарождение трещины в условиях медленного деформирования”, которое за рассматриваемый период эксплуатации имеет вид:

$$D_\varepsilon = \sum (\Delta \varepsilon_{\text{лок}} / \varepsilon_{\text{кр}}), \quad (4)$$

где D_ε - суммарное повреждение;

$\Delta \varepsilon_{\text{лок}}$ - приращение деформации в концентраторе за этап;

$\varepsilon_{\text{кр}}$ - критическая деформация, которая зависит от скорости деформации ξ , температуры и флюкса нейтронов Φ .

При $D_\varepsilon \geq 1$, возможно зарождение трещины в шпильке и необходимо проверить условие хрупкой прочности (критерий инициации нестабильного развития трещины):

$$K_I(c) < K_{JC}(F, T, T_{\text{обл}}), \quad (5)$$

где K_I – коэффициент интенсивности напряжений, зависящий от размера трещины s и нагруженности шпильки, $\text{МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$;

K_{JC} – вязкость разрушения, $\text{МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$, значение которой определяется по формуле:

$$K_{JC} = f(E^T, J_c, \nu), \quad (6)$$

где E^T - модуль упругости (Юнга);

$\nu=0,3$ - коэффициент Пуассона;

J_c – интеграл, критическое значение.

Анализ результатов вариантных расчетов показал необходимость проведения дополнительных мероприятий:

- снижения неопределенностей в значениях флюенса, распухания и механических свойств, предоставленных ГНЦ НИИАР, проведение исследований по соосности направляющих труб,
- корректировки ИЦП МАЭ коэффициента в формуле распухания;
- заключения ЦНИИ КМ “Прометей” о применимости критерия предельного состояния работоспособности элементов крепления биологической защиты поворотных пробок реактора для исследуемого материала.

Поскольку шпильки не могут быть извлечены для проведения материаловедческих исследований, то в ГНЦ НИИАР было принято решение оценить фактическое состояние материала на основании исследований металла фрагмента нижней части направляющей трубы исполнительного механизма СУЗ, расположенного в малой поворотной пробке, изготовленного из того же материала и работавшего в тех же условиях.

После выполнения вышеназванных работ реалистичным признан расчет по варианту 1 (без учета программной погрешности нейтронно-физического расчета и с уменьшенным в два раза коэффициентом в формуле распухания). В этом варианте соотношение температуры, флюенса и распухания соответствуют фактическому.

Результаты расчёта для шпилек МПП и БПП приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результат расчета шпилек МПП и БПП

Наименование	Обозначение	Шпилька	Результат расчёта для шпилек МПП				Шпилька	Результат расчёта для шпилек БПП			
			Вариант 1 в конце этапа		Вариант 2 в конце этапа			Вариант 1 в конце этапа		Вариант 2 в конце этапа	
			этап 6	этап 7	этап 6	этап 7		этап 6	этап 7	этап 6	этап 7
Конец этапа эксплуатации	-	-	31.12.2009	31.12.2015	31.12.2009	31.12.2015		31.12.2009	31.12.2015	31.12.2009	31.12.2015
Суммарное повреждение	D_{Σ}	Ш1	1,930	2,940	7,370	11,300	Ш1	1,300	1,830	6,660	10,100
		Ш2	0,895	1,300	2,990	4,460	Ш5	-	-	4,960	7,420
		Ш4	1,430	2,200	5,580	8,560					
Длина трещины, мм	s_x	Ш1	0,072	0,220	1,074	1,932	Ш1	0,000	0,066	0,888	2,013
		Ш2	0,000	0,000	0,227	0,534	Ш5	-	-	0,557	1,204
		Ш4	0,000	0,126	0,700	1,605					
Коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м ^{1/2}	K_I	Ш1	15,75	37,38	176,06	318,57	Ш1	0,00	14,11	162,5	328,5
		Ш2	0,000	0,000	37,10	76,12	Ш5	-	-	99,62	195,47
		Ш4	0,000	22,23	113,61	233,27					
Вязкость разрушения, МПа·м ^{1/2}	K_{Ic}	Все	40,73	40,68	40,68	40,72	Все	41,71	41,01	41,01	40,75
Заключение по размеру трещины	-	Ш1	не критическая	не критическая	больше критической	больше критической	Ш1	отсутствует	не критическая	больше критической	больше критической
		Ш2	отсутствует	отсутствует	близка к критической	больше критической	Ш5	-	-	близка к критической	больше критической
		Ш4	отсутствует	не критическая	больше критической	больше критической					

Данный расчет показал, что в резьбе наиболее нагруженной (ближайшей к центру активной зоны) шпильки малой поворотной пробки возможно появление трещины к концу 2009г. В наиболее нагруженных шпильках большой поворотной пробки появление трещины возможно только после 2009 г. Возможные трещины в шпильках не являются критическими до 2015 г. Однако в виду невозможности инструментального обследования состояния шпилек требуется предусмотреть реконструкцию - усиление крепления плит малой поворотной пробки, например, за счет модернизации конструкции направляющих труб исполнительного

механизма СУЗ. Проект усиления разработан в ОКБ “ГИДРОПРЕСС”. При необходимости, для уточненного расчета подраста трещины может быть использован метод непосредственного моделирования трещины в программном комплексе ANSYS.

Заключение

ИР БОР-60 единственный в мире действующий реактор на быстрых нейтронах эксплуатируемый почти 50 лет (50-летний юбилей исполнится в 2019г.). Создатели реактора назначали срок службы 20 лет, но в действительности назначенный срок эксплуатации существенно превышен (в 2019г. будет 50 лет). Важнейшим вопросом стало продление назначенного срока эксплуатации, что и нашло отражение в данной статье.

На примере элементов крепления малой и большой поворотных пробок показаны особенности проведения расчетов при продлении срока эксплуатации, выполненных в ОКБ “ГИДРОПРЕСС”: проведено определение напряженно-деформированного состояния по программе ANSYS с учетом результатов нейтронно-физического расчета, теплогидравлического расчета, формулы для определения объемного распухания на характерных этапах эксплуатации. Для рассмотренных вариантов проведен анализ статической прочности шпилек поворотных пробок и проверка критерия зарождения и роста трещины при медленном деформировании. Определено суммарное повреждение и далее проверено выполнение условия хрупкой прочности для резьбы шпилек. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных величин распухания материала.

По результатам расчета и проведенных материаловедческих и расчетных исследований сделано положительное заключение о прочности элементов крепления биологической защиты поворотных пробок реактора (не достижения ими предельного состояния) на период эксплуатации с 2010 по 2015 г. При этом, предпосылки и допущения принятые в расчете, и результаты расчета должны постоянно подтверждаться прямыми и/или косвенными измерениями состояния элементов (не реже 1 раза год) в процессе мониторинга технического состояния.

Кроме того, что ИЯУ БОР-60 продолжает выполнять свои функции по научно-исследовательским и экспериментальным работам, по производству электроэнергии и теплообеспечению ГНЦ НИИАР, продление срока эксплуатации ИР БОР-60 является примером комплексного подхода к проблеме продления срока эксплуатации в целом и путям решения стоящих на сегодня технических и исследовательских проблем, снятия излишнего консерватизма.

Опыт эксплуатации – единственный объективный показатель достигнутого уровня освоения “быстрых натриевых” технологий и потому опыт продления срока эксплуатации ИР БОР-60 является залогом дальнейшего развития “быстрых натриевых” технологий. В этом заслуга как главного конструктора ИР БОР-60 ОКБ “ГИДРОПРЕСС”, так и ученых и специалистов многих предприятий и организаций, участвовавших в его создании и обосновании дальнейшей работоспособности, и, особенно, людей, бережно и грамотно эксплуатирующих эту установку АО ГНЦ НИИАР.

Работы по продлению срока эксплуатации реактора БОР–60 имеют большое значение как для продления срока эксплуатации действующей РУ БН-600, так и для назначения 45-60 летнего срока эксплуатации реакторов и оборудования, работающих с натриевым теплоносителем, РУ БН-800 и проектируемой РУ БН-1200, а также для создания достоверных расчетных методик и прогнозирования длительных свойств конструкционных материалов.