

МОДЕРНИЗАЦИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ПИК ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Третьяков И.Т., Лопаткин А.В., Романова Н.В., Пулинец А.А., Афремов Д.А.,
Докелин П.С., Ларионов И.А., Кравцова О.А., Мороко В.И., Ткачёв Д.В.
(АО «НИКИЭТ», Москва, Россия)

Введение

Основное назначение реактора ПИК – эксперименты на выведенных нейтронных пучках, а также облучение в центральной нейтронной ловушке, отражателе и активной зоне [1], для чего требуются высокие плотность потока нейтронов и длительность облучения. Данные параметры зависят от мощности и кампании реактора. В настоящий момент реактор ПИК находится на стадии энергетического пуска, при этом существующая активная зона реактора, представленная пусковым комплектом ТВС ПИК-1, обладает рядом особенностей, не позволяющими принять данный комплект ТВС в качестве рабочего:

- непродолжительная работа на номинальной мощности;
- отсутствие возможности старта на свежей активной зоне;
- неоптимальное топливное профилирование;
- отсутствие возможности размещения в активной зоне необходимого количества образцов-свидетелей (ОС);
- наличие только одного комплекта ТВС при отсутствии технологии изготовления и оснастки.

На основании решения НТС ГК «Росатом» № 2 в соответствии с принятой концепцией была разработана модернизированная активная зона с комплектом ТВС ПИК-2, позволяющая улучшить потребительские характеристики реакторной установки, в том числе увеличить длительность кампании реактора на номинальной мощности. Проект активной зоны основан на отработанных технических решениях, обеспечивающих эффективную и безопасную эксплуатацию реактора, а также позволяющих с минимальными затратами организовать устойчивое топливное обеспечение реактора со сниженным потреблением ТВС.

1. Содержание разработки

В основе проекта активной зоны с ТВС ПИК-2 лежит концепция модернизации первоначального варианта активной зоны реактора ПИК с увеличением длительности кампании и обеспечением требуемого запаса реактивности за счет увеличения топливной загрузки, использования выгорающего поглотителя и перехода на малопоглощающие конструкционные материалы [2, 3]. Активная зона с ТВС ПИК-2 повторяет большинство конструктивных решений активной зоны с ТВС ПИК-1 за исключением следующих изменений:

- увеличена номинальная загрузка ^{235}U в твэле;
- изменено профилирование загрузки ^{235}U в шестигранных ТВС;
- использованы шестигранные ТВС одного типа во внешнем и внутреннем ряду активной зоны;
- изменен профиль твэла с увеличением площади топливного сердечника;
- введены стержни выгорающего поглотителя (СВП) двух типов на основе Gd_2O_3 вместо твэлов и вытеснителей в ТВС;
- заменен материал кожуха ТВС со стали на циркониевый сплав;

- добавлен третий тип ТВС – квадратная с полостью под ОС;
- добавлена перфорация кожуха ТВС.

2. Состав и компоновка

В состав модернизированной активной зоны входят:

- 18 ТВС;
- 10 РО СУЗ;
- 18 вытеснителей ТВС.

ТВС ПИК-2 делятся на три типа в зависимости от конструкции и внутреннего состава: ТВС тип 1 (шестигранной формы), ТВС тип 2 (квадратной формы) и ТВС тип 3 (квадратной формы с полостью под ОС). Активная зона набирается из двенадцати шестигранных ТВС, четырех квадратных ТВС и двух квадратных ТВС с полостью под ОС. Вытеснители ТВС используются на этапе энергетического пуска вместо ТВС и имеют подобную им геометрию. РО СУЗ вновь не разрабатывались и соответствуют существующей конструкции [1].

Дополнительно разработана имитационная зона из 18 стальных имитаторов ТВС. Имитаторы ТВС используются для проведения гидравлических испытаний без топлива.

Состав ТВС и РО СУЗ при работе на номинальной мощности приведен в таблице 1, компоновка активной зоны – на рис. 1 и 2.

Таблица 1

Состав активной зоны при работе на номинальной мощности

Параметр	Значение
Количество ТВС в активной зоне, шт:	
• ТВС тип 1 (шестигранная);	12
• ТВС тип 2 (квадратная);	4
• ТВС тип 3 (квадратная с полостью под ОС)	2
Количество РО СУЗ, шт:	
• стержни КС ¹⁾ (РР) ²⁾ ;	6
• стержни АЗ ³⁾ ;	2
• шторки с функциями АР ⁴⁾ , КС, АЗ	2
¹⁾ Компенсирующий стержень. ²⁾ Ручной регулятор. ³⁾ Аварийная защита. ⁴⁾ Автоматический регулятор.	

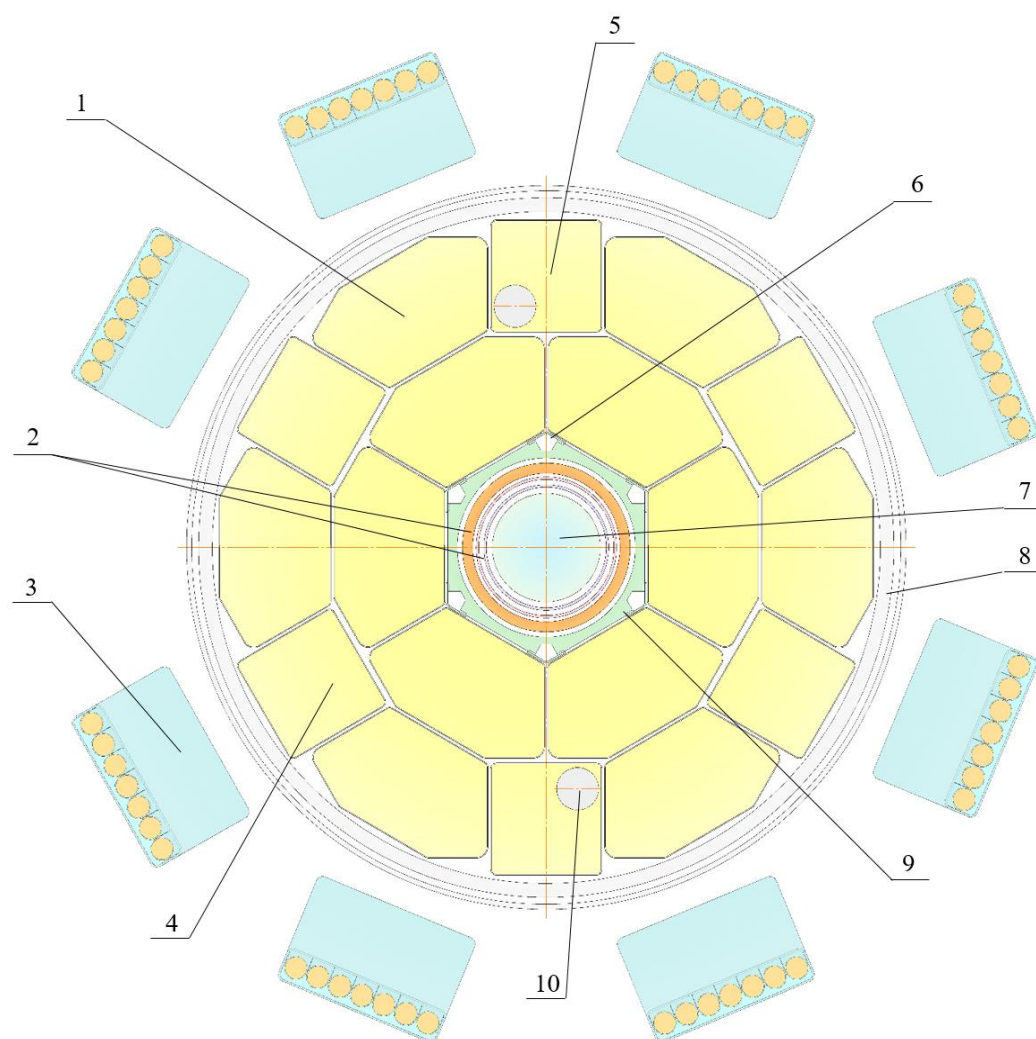


Рис. 1. Поперечное сечение активной зоны:

- 1 — ТВС тип 1 (шестигранная); 2 — шторки СУЗ; 3 — стержень СУЗ;
 4 — ТВС тип 2 (четырёхгранная); 5 — ТВС тип 3 (четырёхгранная с ОС);
 6, 10 — полость под ОС; 7 — центральный экспериментальный канал;
 8 — корпус и кожух; 9 — направляющая

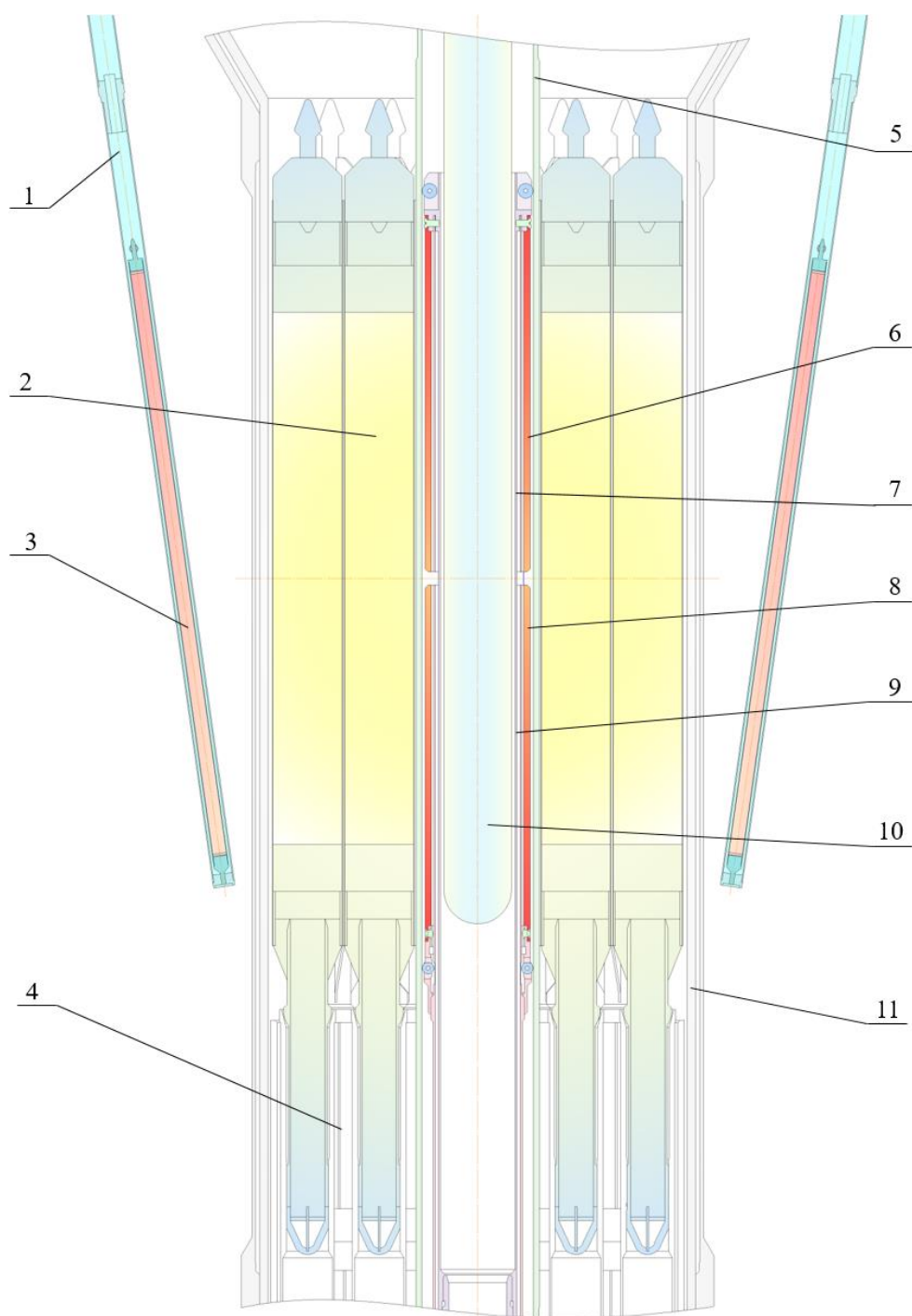


Рис. 2. Осевое сечение активной зоны:

- 1 – стержень СУЗ; 2 – ТВС; 3 – поглощающий элемент стержня СУЗ;
 4 – опорная решетка; 5 – направляющая; 6 – поглощающая часть верхней шторки СУЗ;
 7 – тяга и дистанционирующий элемент верхней шторки СУЗ; 8 – поглощающая часть
 нижней шторки СУЗ; 9 – дистанционирующий элемент нижней шторки СУЗ;
 10 – центральный экспериментальный канал; 11 – корпус и кожух

3. Конструкция ТВС

ТВС состоят из пучка стержневых крестообразных твэлов, полуцилиндрических и крестообразных СВП, обойм и секций, обеспечивающих дистанционирование твэлов и СВП, наружного кожуха шестигранного или квадратного сечения с отверстиями, головки и хвостовика, блока с полостью для размещения навесок с ОС (ТВС тип 3). ТВС ПИК-2 геометрически аналогичны пусковому комплекту ТВС.

Конструкция ТВС приведена на рис. 3, состав твэлов и СВП – в таблице 2.

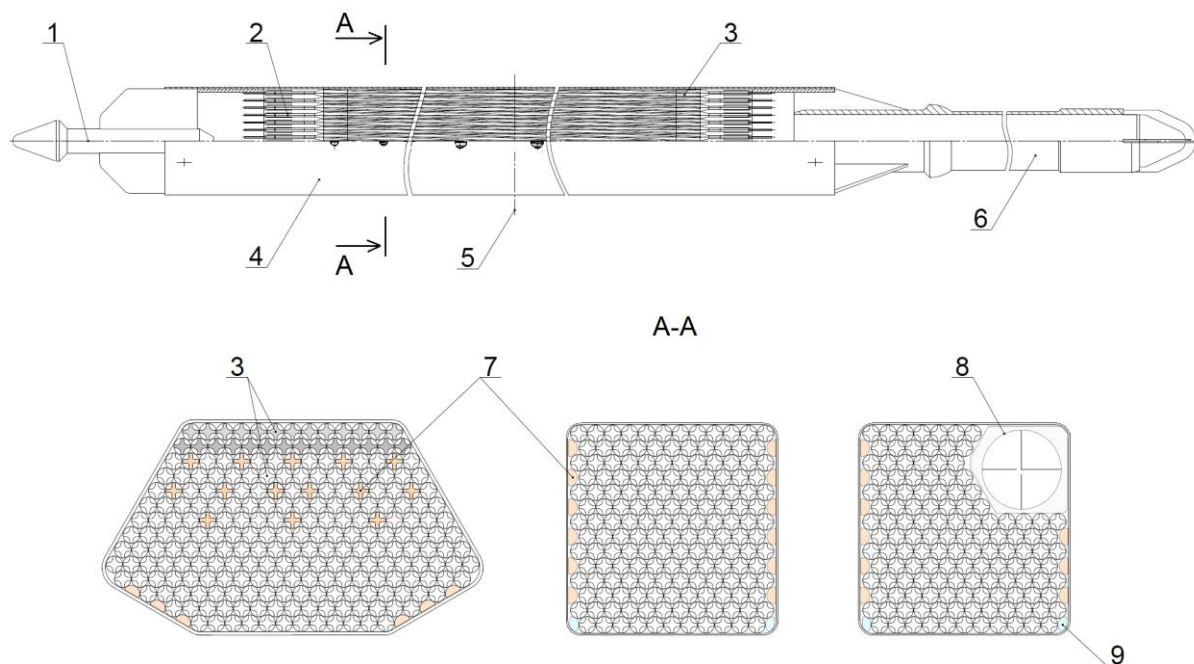


Рис. 3. Конструкция ТВС:

1 – головка; 2 – дистанционирующие обоймы; 3 – твэлы; 4 – кожух; 5 – центральная плоскость активной зоны; 6 – хвостовик; 7 – СВП; 8 – блок с полостью по ОС; 9 – угловой вытеснитель

Таблица 2

Состав ТВС ПИК-2

Тип ТВС	Количество
Тип 1 (шестигранная):	
• твэл – загрузка 0,38 от номинала;	13
• твэл – загрузка 0,69 от номинала;	14
• твэл – номинальная загрузка;	200
• крестообразный СВП;	14
• полуцилиндрический СВП	6
Тип 2 (квадратная);	
• твэл – номинальная загрузка;	161
• полуцилиндрический СВП	12

Состав ТВС ПИК-2

Тип ТВС	Количество
Тип 3 (квадратная с полостью под ОС)	
• ТВЭЛ – загрузка 0,69 от номинала;	1
• ТВЭЛ – номинальная загрузка;	130
• полуцилиндрический СВП	9

ТВЭЛы ТВС ПИК-2 представляют собой стержни крестообразного сечения с закруткой вокруг оси. Топливо – гранулы высокообогащенного UO_2 , диспергированные в медной матрице с добавлением бериллиевой бронзы. В основе принятой конструкции лежит отработанная технология ТВЭЛов реактора СМ-3 с увеличенной высотой топливного столба. ТВЭЛы представлены в трех типах в зависимости от загрузки ^{235}U .

СВП ТВС ПИК-2 представлены в виде стержней двух типов: полуцилиндрического сечения и крестообразного сечения с закруткой вокруг оси. В качестве материала выгорающего поглотителя используется композиция из оксидов циркония, ниобия, иттрия и гадолиния с различной загрузкой по высоте.

4. Характеристики реактора

По результатам расчетов обоснована возможность работы реактора в равновесном режиме частичных перегрузок по 1/2 части активной зоны с продолжительностью кампании на номинальной мощности 100 МВт от 20 до 25 суток (рис. 4).

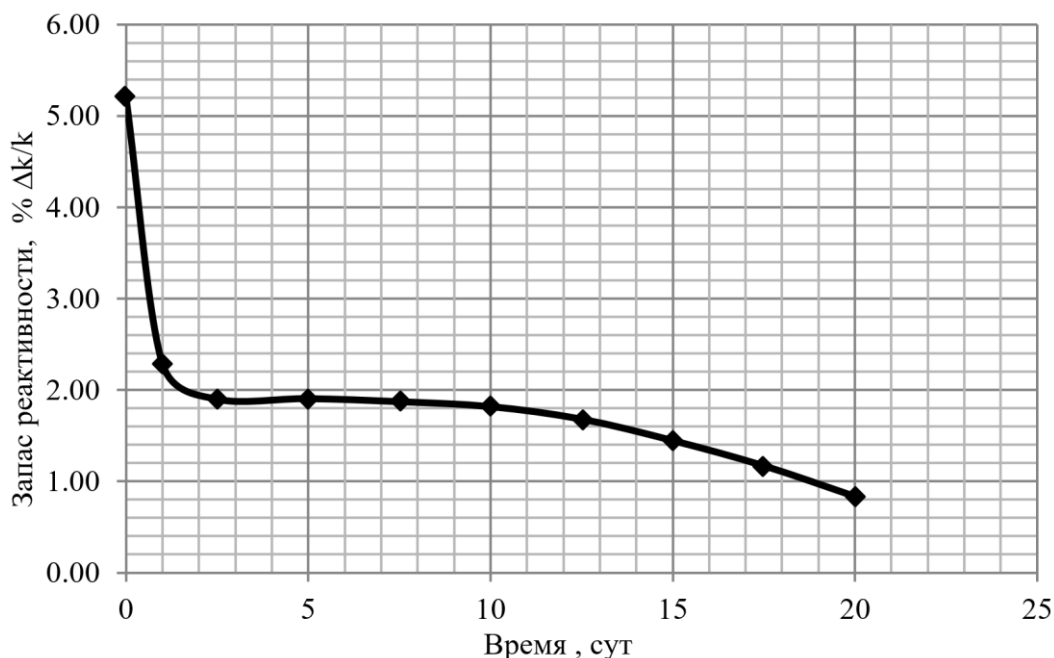


Рис. 4 – Изменение запаса реактивности в течение равновесной кампании при работе на номинальном уровне мощности

Основные технические характеристики и параметры реактора с модернизированной активной зоной приведены в таблице 3.

Таблица 3

Технические характеристики и параметры реактора с активной зоной с ТВС ПИК-2

Характеристика/параметр	Значение
Номинальная мощность, МВт	100
Теплоноситель	H ₂ O
Температура теплоносителя, °С:	
• на входе в активную зону;	50
• на выходе из активной зоны	83,5
Давление теплоносителя на входе, МПа	5,0
Номинальный расход теплоносителя, м ³ /ч	2400
Полный перепад давления на активной зоне при номинальном расходе, МПа	0,274
Максимальная плотность потока нейтронов в центральной ловушке (невозмущенная), 1/(см ² ·с):	
• тепловых с E<0,625 эВ;	4,2·10 ¹⁵
• быстрых с E>0,1 МэВ	1,1·10 ¹⁵
Максимальная плотность потока нейтронов в отражателе (невозмущенная), 1/(см ² ·с):	
• тепловых (E<0,625 эВ);	1,3·10 ¹⁵
• быстрых (E>0,1 МэВ)	7,9·10 ¹⁴
Продолжительность кампании реактора, сут	20 – 25
Средняя глубина выгорания ²³⁵ U в ТВС ПИК-2 в основном режиме перегрузок по ½ части активной зоны, %	
• ТВС ПИК-2 тип 1;	22
• ТВС ПИК-2 тип 2;	21
• ТВС ПИК-2 тип 3	21
Максимальная температура топлива, °С	443,0
Максимальная температура оболочки (наружная поверхность), °С	261,6
Максимальное удельное объемное энерговыделение в твэле, кВт/см ³	15,7
Максимальная плотность теплового потока, МВт/м ²	12,9
Максимальный коэффициент неравномерности энерговыделения по объему активной зоны K _v	2,5
Минимальный коэффициент запаса до кризиса теплообмена	1,4
Максимальная скорость теплоносителя в ТВС, м/с	11,7

Выход в режим частичных перегрузок осуществляется при вводе в эксплуатацию на этапе энергетического пуска. В проекте определена пусковая конфигурация активной зоны, порядок загрузки ТВС, мощность пускового источника, предельная мощность реактора, проведено моделирование работы на мощности в течение первых трех циклов. Запас реактивности, подкритичность и эффективность РО СУЗ для стартовой и равновесной кампании приведены в таблице 4.

Таблица 4

Запас реактивности, подкритичность и эффективность РО СУЗ

Характеристика	Значение на начало кампании, % $\Delta k/k$	
	Стартовая кампания	Равновесная кампания
Запас реактивности без выгорающего поглотителя	13,0	10,50
Запас реактивности с заполненными гадолинием СВП	5,94	5,65
Подкритичность, шторки на ПКВ ¹⁾ , стержни КС введены	1,42	1,76
Подкритичность, все РО СУЗ введены	3,06	3,32
Суммарная эффективность стержней КС и шторок в функции АР, КР	7,36	7,41
Эффективность двух стержней АЗ (шторки сведены, КС погружены)	0,63	0,63
Эффективность шторок в режиме АЗ (КС погружены, стержни АЗ взведены)	0,99	0,98
¹⁾ Промежуточный концевой выключатель		

Для элементов активной зоны консервативно обоснована работоспособность в части прочности конструкции и устойчивости к внешним воздействиям как при нормальных условиях эксплуатации, так и при их нарушениях. Параметры работы РО СУЗ с новой активной зоной обеспечивают их работоспособность во всех режимах эксплуатации.

Радиационная обстановка при нормальной эксплуатации реактора во всех рассматриваемых режимах соответствует допустимой. Радиационные характеристики отработавших элементов активной зоны позволяют обеспечить их выдержку в течение необходимого времени и утилизацию.

Ядерная и радиационная безопасность реактора обеспечивается как при нормальных условиях эксплуатации, так и при их нарушениях для следующих исходных событий:

- с введением избыточной реактивности;
- с нарушением теплоотвода;
- с изменением давления в первом контуре;
- с ухудшением отвода тепла вторым контуром;
- с нарушениями при работе с ядерным топливом;
- природного и техногенного происхождения.

При возникновении исходных событий обеспечивается перевод реактора в безопасное состояние без превышения установленных в проекте пределов безопасной эксплуатации по облучению персонала и населения.

5. НИОКР

В качестве обосновывающих НИОКР проведены гидравлические и вибрационные испытания полномасштабных макетов ТВС, изготовленных в АО «МСЗ» (рис. 5). Схема рабочего участка гидравлических испытаний приведена на рис. 6.

Полученные экспериментальные гидравлические характеристики использованы для настройки гидравлического сопротивления ТВС в расчетной модели. Динамические характеристики, полученные в результате вибрационных испытаний, подтверждают вибропрочность и сейсмостойкость конструкции ТВС.

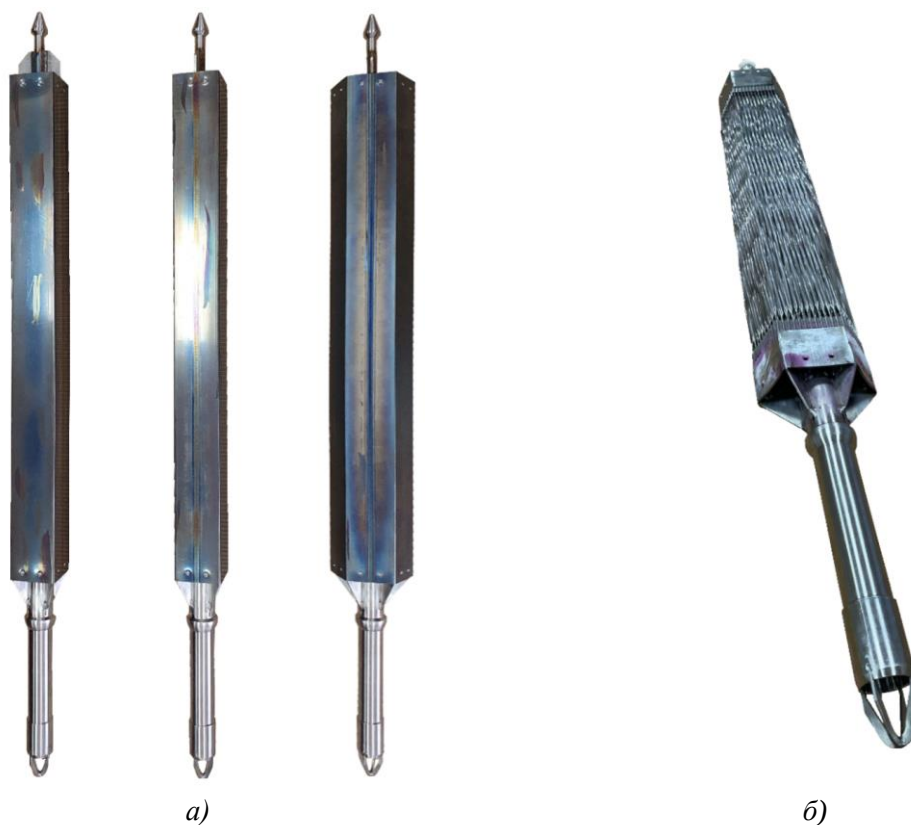


Рис. 5. Макеты ТВС:

а) – макеты ТВС трех типов; б) – макет шестигранной ТВС со снятым кожухом

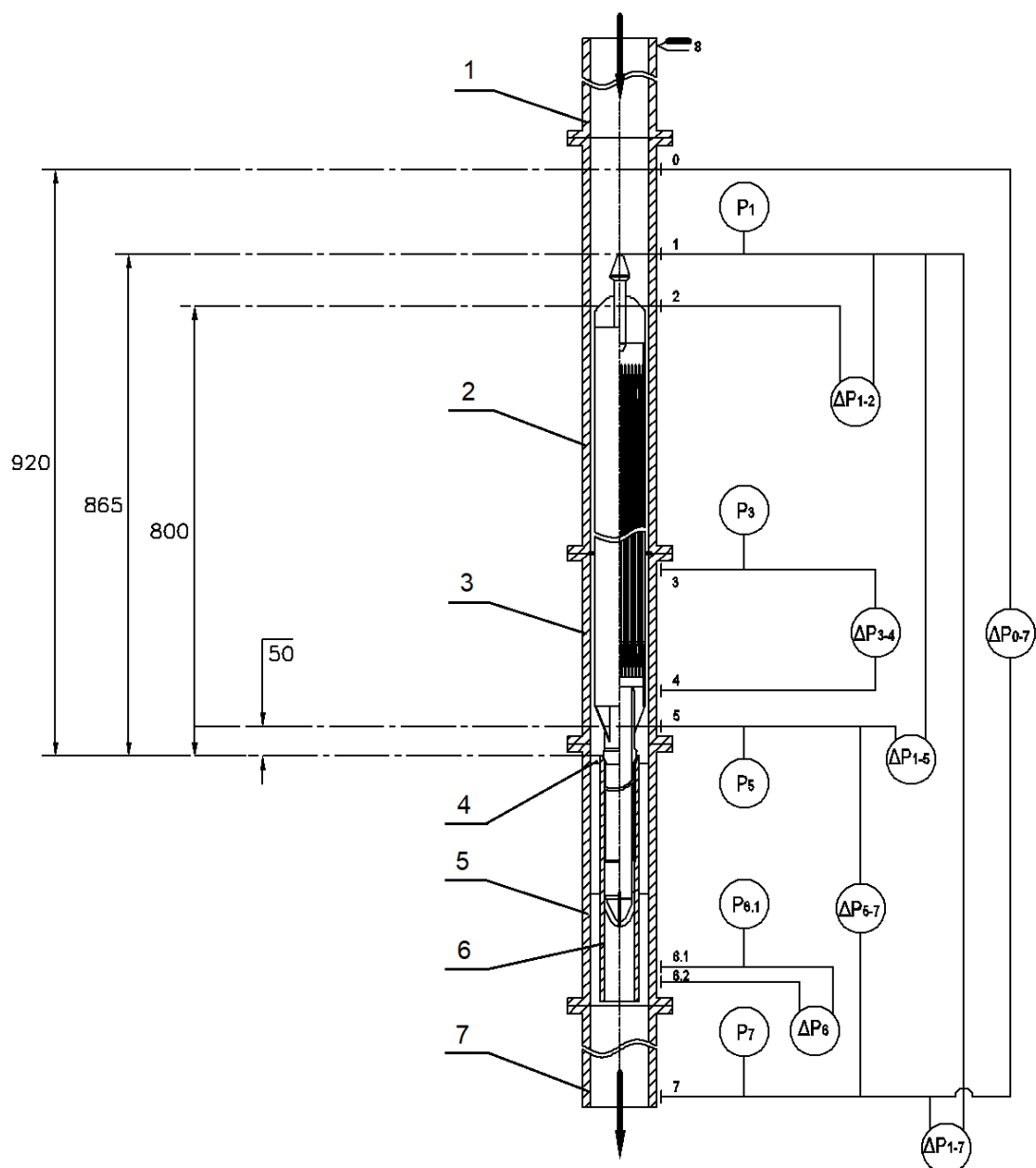


Рис. 6. Схема рабочего участка гидравлических испытаний ТВС ПИК-2:

1 – подводящий участок; 2 – входной участок; 3 – промежуточный участок;
4 – посадочное место; 5 – выходной участок; 6 – обсадная труба; 7 – отводящий участок

Заключение

В результате выполненного комплекса научно-исследовательских и конструкторских работ был разработан проект модернизированной активной зоны реактора ПИК с ТВС ПИК-2.

Активная зона с ТВС ПИК-2 позволяет перейти к более эффективной эксплуатации реактора с увеличенной кампанией и сниженным потреблением ТВС при сохранении его основных эксплуатационных характеристик. Проект основан на отработанных технических решениях по конструкции ТВС и технологии изготовления твэлов, удовлетворяет требованиям федеральных норм и правил в области использования атомной энергии.

По результатам расчетов обоснованы достаточный уровень самозащищенности и безопасности реактора как при нормальной эксплуатации, так и при ее нарушениях,

показано выполнение требований заказчика к характеристикам реактора. Основным режимом работы реактора с активной зоной с ТВС ПИК-2 является равновесный режим частичных перегрузок по 1/2 части. Номинальная мощность составляет 100 МВт, длительность кампании – от 20 до 25 суток. Максимальная плотность потока тепловых нейтронов составляет: $4,2 \cdot 10^{15}$ 1/(см²·с) в центральной ловушке, $1,3 \cdot 10^{15}$ 1/(см²·с) в отражателе. Среднее выгорание топлива в выгружаемых ТВС – 22 %. Максимальная локальная плотность теплового потока составляет 12,9 МВт/м², минимальный коэффициент запаса до кризиса теплообмена – 1,4.

В АО «МСЗ» отработана технология изготовления ТВС, изготовлены полномасштабные макеты, имитаторы и опытная партия ТВС. В ПАО «НЗХК» изготовлены вытеснители ТВС.

При осуществлении НИОКР проведены необходимые гидравлические и вибрационные испытания ТВС.

По результатам экспертизы ФБУ «НТЦ ЯРБ» получено положительное заключение на выполнение работ первого этапа энергетического пуска ИЯУ ПИК с новой активной зоной.

Список литературы

1. НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. Установки. Реактор ПИК [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.pnpi.nrcki.ru/ustanovki/reactor-pik>, свободный – (01.06.2023).
2. Ковальчук М.В., Аксенов В.Л., Ерыкалов А.Н., Захаров А.С., Коноплев К.А., Косолапов И.М., Онегин М.С., Полтавский А.С., Смольский С.Л., Фридман С.Р. Концепция эксплуатационного комплекта ТВС реактора ПИК. // III Международная научно-техническая конференция «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ – 2014): сборник докладов. — М.: ОАО «НИКИЭТ». 2014. – Т.1. с. 339–347.
3. Захаров А.С., Коноплев К.А., Косолапов И.М., Онегин М.С., Полтавский А.С., Смольский С.Л., Фридман С.Р. Выгорающий поглотитель для модернизированных ТВС реактора ПИК. // IV Международная научно-техническая конференция «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ – 2016): сборник докладов. — М.: АО «НИКИЭТ». 2016. – Т.1. с. 338–349.