

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

УДК 669.018

РОССИЙСКАЯ ПРОГРАММА СНИЖЕНИЯ ОБОГАЩЕНИЯ ТОПЛИВА В ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РЕАКТОРАХ

*В.Г. Аден, Е.Ф. Карташев, В.А. Лукичев, ФГУП НИКИЭТ им. Н.А. Доллежаля;
П.И. Лавренюк, В.М. Чернышов, ОАО ТВЭЛ;
А.В. Ватулин, А.В. Морозов, В.Б. Супрун, ФГУП ВНИИНМ им. А.А. Бочвара,
г. Москва;
А.Б. Александров, А.А. Енин, ОАО НЗХК, г. Новосибирск, Россия*

Представлены основные результаты работ по российской программе снижения обогащения топлива в исследовательских реакторах и перспективы на будущее.

ВВЕДЕНИЕ

В 1994 г. приказом по Минатому введена в действие Отраслевая программа «Создание твэлов и ТВС с топливом 20 %-го обогащения по урану-235 для активных зон исследовательских реакторов».

Основные цели Программы:

- предотвращение распространения ядерного оружия. Российская Федерация и страны – производители ядерного топлива проводят общую политику по минимальному использованию и исключению в конечном счёте из гражданских атомных программ во всём мире высокообогащённого урана – материала, используемого для производства атомного оружия. В этом отношении исследовательские и испытательные реакторы вызывают особую озабоченность, потому что основное потребление высокообогащённого урана ($\text{VOU} > 20\% \text{ }^{235}\text{U}$) в гражданских целях осуществляется в этих реакторах. Если исследовательские реакторы перевести на топливо, содержащее низкообогащённый уран (НОУ, $< 20\% \text{ }^{235}\text{U}$), то ВОУ, используемый для производства атомного оружия, был бы практически исключён из применения в гражданских атомных программах;
- сохранение рынка по поставкам ТВС в СНГ, Восточную Европу и др.;
- обеспечение возможности участия России в конкурсных проектах по созданию исследовательских реакторов в различных странах мира.

Программа состоит из 3-х основных этапов:

1. Разработка и создание твэлов и ТВС с топливом на основе $\text{UO}_2\text{-Al}$.
2. Разработка и создание твэлов и ТВС с высокоплотным топливом (ВПТ) на основе уран-молибденовых сплавов.
3. Разработка твэлов и ТВС нового поколения для исследовательских реакторов.

В Программе снижения обогащения топлива в исследовательских реакторах участвуют ОАО ТВЭЛ, ДАЭ Минатома, ФГУП НИКИЭТ, ФГУП ВНИИНМ, ОАО НЗХК, ФГУП ГНЦ РФ НИИАР, ФГУП ГНЦ РФ ФЭИ, ФГУП ИРМ, ФГУ РНЦ КИ,

ПИЯФ РАН, ИЯФ Академии наук Республики Узбекистан.

1-Й ЭТАП. РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ТВЭЛОВ И ТВС С ТОПЛИВОМ НА ОСНОВЕ $\text{UO}_2\text{-Al}$

В настоящее время работы по **первому этапу** находятся в стадии завершения. Проведен значительный объем лабораторных, конструкторских и технологических разработок, реакторных и послереакторных исследований.

Результатами этих работ явились:

- разработка технических проектов ТВС типа ВВР-М2 для реакторов в Венгрии, Украине, Вьетнаме и ТВС типа ИРТ-4М для реакторов в Чехии, Узбекистане, Ливии, Болгарии, Северной Корее;
- постановка ТВС типа ВВР-М2 и ИРТ-4М на производство на ОАО «НЗХК».

ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОЕКТ ТВС ТИПА ВВР-М2

В 2000 г. НИКИЭТ разработал технический проект тепловыделяющей сборки типа ВВР-М2 (рис. 1), предназначенной для эксплуатации в исследовательских реакторах в Венгрии, Украине и Вьетнаме.

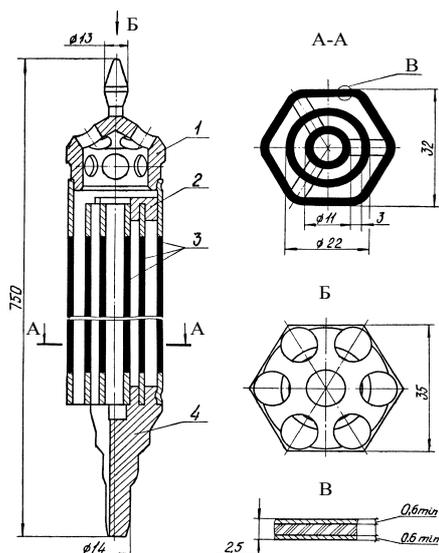


Рис. 1. ТВС односекционная типа ВВР-М2:
1 – головка; 2 – венчик; 3 – твэлы; 4 – хвостовик

В техническом проекте приведены условия работы ТВС, конструкция ТВС, результаты экспериментальных работ в подтверждение работоспособности ТВС, нейтронно-физические и теплогидравлические расчеты применительно к реактору ВВР-СМ в Венгрии.

Реактор ВВР-СМ, в котором используются ТВС ВВР-М2, является реактором бассейнового типа. Активная зона (рис. 2) собирается из односекционных и трехсекционных ТВС. Каждая ТВС устанавливается в опорной плите по треугольной решетке с шагом 35 мм.

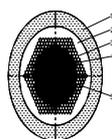


Рис. 2. Схематический поперечный разрез реактора ВВР-СМ с активной зоной из 223 ТВС типа ВВР-М2: 1 – вода; 2 – массив стационарного бериллиевого отражателя; 3 – сменные бериллиевые блоки; 4 – ТВС; 5 – СУЗ)

В настоящее время в реакторе ВВР-СМ используются ТВС с топливом 36 % обогащения по урану-235 ($UO_2 + AL$), загрузка трехтрубной односекционной ТВС составляет 45 г по урану-235.

Переход на топливо пониженного обогащения (19,7 %) требует увеличения загрузки ТВС ураном-235 для компенсации дополнительного поглощения нейтронов в уране-238. Выбор загрузки ТВС ураном пониженного обогащения определяется из условий сохранения нейтронно-физических характеристик реактора (запас реактивности, глубина выгорания, кампания, плотность потоков нейтронов в экспериментальных устройствах). Существенно, что увеличение загрузки ТВС должно происходить без изменения наружной геометрии твэлов, что означает сохранение неизменным такого важного параметра, как отношение металл-вода в активной зоне.

Величина загрузки топлива в твэле ограничивается технологическими возможностями формирования трехслойной конструкции твэла методом совместного горячего прессования.

В результате проведенных нейтронно-физических расчетов и технологических обработок изготовления твэлов была выбрана топливная композиция в виде двуоксида урана с загрузкой урана-235 в односекционной ТВС – 50 г (150 г в трехсекционной ТВС соответственно).

Заводом-изготовителем освоена технология производства твэлов с металлокерамической композицией с удельным содержанием урана до 2,5 г/см³. Работоспособность металлокерамической композиции подтверждена многолетней эксплуатацией в реакторе ИВВ-2М и других реакторах.

В качестве материала оболочек твэлов и концевых деталей ТВС выбран алюминиевый сплав марки САВ-1, который используется в ТВС ВВР-М2 и подтвердил свою работоспособность в течение многолетней эксплуатации в реакторах ВВР-М при тех же условиях эксплуатации, что и разрабатываемая ТВС.

Условия работы ТВС в активной зоне реактора показаны в табл. 1.

Таблица 1

Условия работы ТВС в активной зоне реактора

Параметр	Значение
Тепловая мощность реактора, МВт	10
Количество ТВС в активной зоне	222...223
Теплоноситель	Вода высокой чистоты
Направление движения теплоносителя в ТВС	Сверху вниз
Температура теплоносителя первого контура на входе в активную зону, °С	40
Расход теплоносителя через ТВС, м ³ /ч	8,43
Давление теплоносителя на входе в активную зону, Па	$1,35 \cdot 10^5$
Перепад давления на активной зоне, Па	$0,39 \cdot 10^5$
Средняя плотность потока нейтронов в активной зоне, см ⁻² с ⁻¹ :	
тепловых	$1,0 \cdot 10^{14}$
быстрых с $E > 0,1$ МэВ	$2,0 \cdot 10^{14}$

Среднее выгорание топлива в наиболее выгоревшей выгружаемой ТВС, %	60
Удельная энерговыработка, МВт·сут/кг _U	105,9

Пять опытных ТВС с металлокерамической композицией с концентрацией 2,5 г/см³ прошли успешные испытания в реакторе ВВР-М ПИЯФ РАН до средних выгораний свыше 75 %. Условия испытаний этих ТВС превосходят условия их работы в реакторе ВВР-СМ в Венгрии, что свидетельствует об их высокой работоспособности.

Проведенные в обоснование технического проекта ТВС ВВР-М2 нейтронно-физические расчеты показали, что при переходе на металлокерамическое топливо с обогащением 19,7 % по урану-235 с увеличением загрузки по урану-235 до 50 г, по сравнению с ТВС ВВР-М2 с металлокерамическим топливом с обогащением 36 % по урану-235 и загрузкой 45 г:

- 1) продолжительность кампании ТВС (до средней глубины выгорания 60 %) увеличивается на 10 %;
- 2) запас реактивности практически не изменяется;

3) плотность потока нейтронов уменьшается:

- максимальная тепловых ($E < 0,625$ эВ) в центральной ловушке на 0,4 %;
- максимальная тепловых ($E < 0,625$ эВ) в отражателе на 2,2 %;
- средняя тепловых ($E < 0,625$ эВ) в активной зоне на 9 %;
- средняя быстрых ($E > 0,8$ МэВ) в активной зоне на 0,8 %.

Теплогидравлические расчеты показали, что в максимально-напряженной ТВС максимальная температура оболочки достигает значения 72 °С, что далеко до температуры насыщения теплоносителя (102 °С) и тем более до температуры начала поверхностного кипения (115 °С) – основного критерия предела нормальной эксплуатации ТВС для данного типа реактора. Параметры наиболее теплонапряженной ТВС представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры наиболее теплонапряженной ТВС

Параметр	Значение			
	1	2	3	4
Количество ТВС в активной зоне	222			
Вариант компоновки активной зоны	1	2	3	4
Мощность реактора, МВт	10			
Средняя мощность ТВС, кВт	42			
Максимальная мощность ТВС, кВт	75	94	85	65
Неравномерность по высоте активной зоны	1,3			
Неравномерность по сечению ТВС	1,04	1,04	1,05	1,04
Температура смешения теплоносителя на выходе из максимально напряженной ТВС, °С	48	50	48	47
Максимальная температура оболочки твэла, °С	65	72	69	62
Максимальная температура топливного сердечника, °С	68	75	72	64
Температура насыщения теплоносителя, °С	103			
Максимальная плотность теплового потока, кВт/м ²	445	557	506	383
Коэффициент запаса до температуры насыщения	2,4	2,0	2,2	2,8
Показатель теплотехнической надежности ТВС	1			

Следует отметить, что реакторы в Венгрии, Украине и Вьетнаме – первые исследовательские реакторы, построенные по российским проектам, которые могут быть полностью переведены на топливо обогащением 19,7 % по урану-235.

ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОЕКТ ТВС ТИПА ИРТ

В 2002 г. НИКИЭТ разработал технический проект тепловыделяющей сборки типа ИРТ-4М (рис. 3), предназначенной для эксплуатации в исследовательских реакторах в Узбекистане, Чехии, Ливии, Болгарии и Северной Корее.

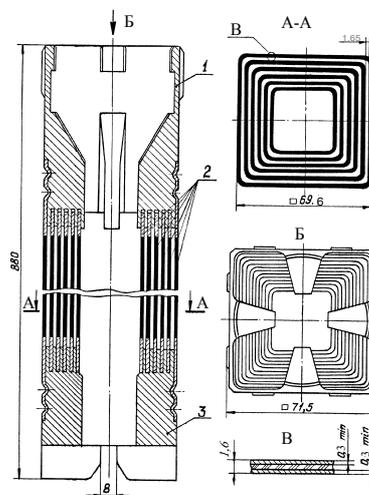


Рис. 3. ТВС шеститвэльная типа ИРТ-4М:
1 – головка; 2 – твэл; 3 – хвостовик

В техническом проекте представлены условия работы ТВС, конструкция ТВС, результаты экспериментальных работ в подтверждение работоспособности ТВС, нейтронно-физические и теплогидравлические расчеты на примере активных зон реакторов ВВР-СМ в Узбекистане и LWR-15 в Чехии.

Реакторы ВВР-СМ (рис. 4) и LWR-15 являются реакторами бассейнового типа. В настоящее время в них используются ТВС типа ИРТ-3М с топливом 36 % обогащения по урану-235.

Использование ТВС типа ИРТ-4М с плотностью урана в топливном сердечнике 3,0 г/см³ позволяет перевести вышеуказанные реакторы на топливо с обогащением 19,7 % по урану-235. В представленном проекте активная зона реактора ВВР-СМ собирается из шеститрубных ТВС ИРТ-4М, а активная зона реактора LWR-15 собирается из шеститрубных и восьмитрубных ТВС ИРТ-4М. Для расширения объема экспериментальной базы реактора возможна установка четырехтрубных ТВС. Каждая ТВС устанавливается в опорной плите по квадратной решетке с шагом 71,5 мм.

Величина загрузки топлива в твэле ограничивается технологическими возможностями формирования трехслойной конструкции твэла методом совместного прессования.

В результате проведенных нейтронно-физических расчетов и технологических обработок изготовления твэлов была выбрана топливная композиция в виде двуокиси урана с загрузкой урана-235 в восьмитрубной ТВС – 300 г, шеститрубной – 263,8 г, четырехтрубной – 200,5 г соответственно.

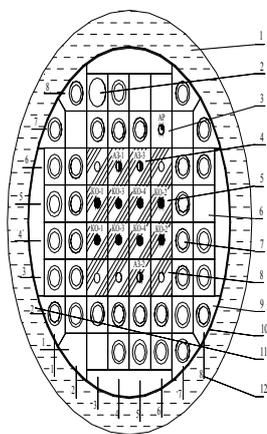


Рис. 4. Схематический поперечный разрез реактора ВВР-СМ с активной зоной из 16 ТВС:

- 1 – вода; 2 – сухой канал диаметром 60 мм в алюминиевом блоке; 3 – сменный бериллиевый блок с каналом РО АР; 4 – шеститрубная ТВС с каналом РО АЗ; 5 – шеститрубная ТВС с каналом РО КО; 6 – сменный бериллиевый блок; 7 – сменный бериллиевый блок с отверстием диаметром 48 мм и экспериментальным каналом диаметром 44 мм; 8 – шеститрубная ТВС с экспериментальным каналом; 9 – стационарный бериллиевый отражатель; 10 – алюминиевая обечайка; 11 – номера строк ячеек; 12 – номера столбцов ячеек

Заводом-изготовителем освоена технология производства твэлов с металлокерамической композицией с удельным содержанием урана до 3,0 г/см³. Конструктивно ТВС ИРТ-4М аналогична ТВС ИРТ-3М, отличие заключается в том, что твэлы в ТВС ИРТ-4М имеют увеличенную до 1,6 мм толщину твэла.

В качестве материала оболочек твэлов выбраны алюминиевые сплавы марки САВ-1 и АМг2.

Как в опытных ТВС ИРТ-4М, так и в комбинированных ТВС типа ИВВ-2М оболочки 50 % твэлов были изготовлены из сплава АМг2. Сплав АМг2 впервые в нашей стране использован в качестве конструкционного материала оболочек экспериментальных твэлов. Это связано с тем, что в процессе изготовления твэлов методом совместного горячего прессования с концентрацией урана в топливе ~ 3 г/см³, оболочки из этого сплава, с повышенными механическими характеристиками, менее подвержены образованию микротрещин и внедрению в них частиц двуокиси урана, по сравнению с традиционными оболочечными алюминиевыми сплавами САВ-1, САВ-6, АМСН-2.

Две восьмитрубные и две шеститрубные опытные ТВС ИРТ-4М с металлокерамической композицией с концентрацией 3,0 г/см³ прошли успешные ресурсные испытания в реакторе ВВР-СМ в Ташкенте до средних выгораний 60 %. Работоспособность металлокерамической топливной композиции с удельным содержанием 3 г/см³ подтверждена также ресурсными реакторными испытаниями двух комбинированных ТВС типа ИВВ-2М в реакторе ИВВ-2М и послереакторными исследованиями твэлов. При испытании комбинированных ТВС типа ИВВ-2М среднее выгорание в испытываемых твэлах достигло ~ 55 %.

Условия работы ТВС в активных зонах реакторов показаны в табл. 3.

Таблица 3

Условия работы ТВС в активных зонах реакторов

Параметр	Значение	
	ВВР-СМ	LWR-15
Реактор	ВВР-СМ	LWR-15
Тепловая мощность реактора, МВт	10	10
Количество ТВС в активной зоне	20	29
Теплоноситель	Вода высокой чистоты по ОСТ 95.10134-91	
Направление движения теплоносителя в ТВС	Сверху вниз	
Температура теплоносителя первого контура на входе в активную зону, °С	40...50	

Расход теплоносителя через ТВС, м ³ /ч:		
Восьмитрубную	33,6	
Шеститрубную	28,7	
Четырехтрубную	21,7	
Давление теплоносителя на входе в активную зону, Па	1,32 · 10 ⁵	
Перепад давления на активной зоне, Па	0,39 · 10 ⁵	
Средняя плотность потока нейтронов в активной зоне, см ⁻² с ⁻¹ :		
тепловых (E < 0,625 эВ)	8,0 · 10 ¹³	5,1 · 10 ¹³
быстрых (E > 0,8 МэВ)	8,9 · 10 ¹³	6,1 · 10 ¹³
Среднее выгорание топлива в наиболее выгоревшей выгружаемой ТВС, %	50	60
Удельная энерговыработка, МВт·сут/кг _U	66,3	90,8

Проведенные в обоснование технического проекта ТВС ИРТ-4М нейтронно-физические расчеты активной зоны реактора LWR-15 (Чехия) показали, что среднее выгорание топлива в выгружаемых ТВС может достигать ≈ 57...60 %. Эффективности

компенсирующих органов системы управления и защиты достаточно для надёжной работы реактора.

Параметры наиболее теплонапряженной ТВС приведены в табл. 4.

Таблица 4

Параметры наиболее теплонапряженной ТВС

Параметр	Значение		
	40	45	50
Температура теплоносителя на входе в АЗ, °С	40	45	50
Номинальная мощность реактора, МВт	10		
Средняя мощность ТВС, кВт	321		
Максимальная мощность ТВС в активной зоне, кВт	433		
Максимальная температура оболочки твэла, °С	82	86	91
Максимальная плотность теплового потока, кВт/м ²	661	662	663
Коэффициент запаса до поверхностного кипения по температуре	1,7	1,6	1,5

Проведенные нейтронно-физические расчёты активной зоны реактора ВВР-СМ (г. Ташкент) показали, что при компоновке активной зоны из 16 ТВС ИРТ-4М среднее выгорание топлива в выгружаемых ТВС не превысит 30 %, а при компоновке активной зоны из 18 ТВС – 40 %. Для достижения средней глубины выгорания топлива в выгружаемых ТВС ИРТ-4М до 50 % (такое выгорание достигается в активной зоне из 16 ТВС ИРТ-3М) необходимо загрузку активной зоны реактора увеличить до 20 ТВС. Эффективности компенсирующих органов СУЗ для всех рассмотренных компоновок активных зон достаточно для надёжной компенсации их запаса реактивности.

При переходе с активной зоны из 16 ТВС ИРТ-3М на активную зону из 20 ТВС ИРТ-4М при сохранении мощности 10 МВт:

- кампания реактора увеличивается на ≈ 6 %;
- средняя плотность потока тепловых нейтронов (E_n < 0,625 эВ) в активной зоне уменьшается на ≈ 9 %;

- средняя плотность потока быстрых нейтронов (E_n > 0,8 МэВ) в активной зоне уменьшается на ≈ 17 %;

- средняя плотность потока тепловых нейтронов (E_n < 0,625 эВ) в первом ряду сменных бериллиевых блоков уменьшается на ≈ 4 %.

Выполненные теплогидравлические расчеты реактора ВВР-СМ позволили определить предельно-допустимую мощность реактора при загрузке в активную зону 16, 18 и 20 ТВС типа ИРТ-4М (все шеститрубные), а также параметры наиболее напряженной ТВС при различных температурах теплоносителя на входе в активную зону. Предельно-допустимая мощность реактора получилась выше номинальной только для компоновки из 20 ТВС при допустимом показателе теплотехнической надежности 0,9987.

Параметры наиболее теплонапряженной ТВС показаны в табл. 5.

Таблица 5

Параметры наиболее теплонапряженной ТВС

Параметр	Значение		
	40	45	50
Температура теплоносителя на входе в АЗ, °С	40	45	50
Количество ТВС в АЗ	16		
Предельно-допустимая мощность реактора, МВт	9,6	8,9	8,1
Максимальная мощность ТВС, кВт	611	567	518
Максимальная температура оболочки твэла, °С	99	98	98
Максимальная плотность теплового потока, кВт/м ²	961	890	817
Коэффициент запаса до поверхностного кипения по тем-			

пературе начала кипения	1,27	1,28	1,29
Количество ТВС в АЗ	20		
Предельно-допустимая мощность реактора, МВт	10 (номинал)	10 (номинал)	9,6
Максимальная мощность ТВС, кВт	535	535	515
Максимальная температура оболочки твэла, °С	92	96	99
Максимальная плотность теплового потока, кВт/м ²	839	841	815
Коэффициент запаса до поверхностного кипения по температуре начала кипения	1,37	1,32	1,27

Таким образом, соответствие нейтронно-физических и теплофизических характеристик ТВС типа ИРТ-4М требованиям технического задания, а также работоспособность этих ТВС в условиях эксплуатации реакторов ВВР-СМ и LWR-15 подтверждены результатами нейтронно-физических и теплогидравлических расчетов активных зон этих реакторов с различным количеством ТВС в них.

Работоспособность ТВС подтверждена ресурсными испытаниями в реакторе ВВР-СМ и опытными твэлами в составе комбинированных ТВС типа ИВВ-2М.

2-Й ЭТАП. РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ТВЭЛОВ И ТВС С ВЫСОКОПЛОТНЫМ ТОПЛИВОМ (ВПТ) НА ОСНОВЕ УРАН-МОЛИБДЕНОВЫХ СПЛАВОВ

Работы по **второму** этапу находятся на стадии реакторных испытаний. В ФГУП ИРМ (г. Заречный Свердловской обл.) проведены ресурсные испытания 2-х комбинированных ТВС типа ИВВ-2М. Эти ТВС содержат по два внутренних твэла с топливом в виде U-9%Mo+Al (сплав ОМ-9), произведенном в ФГУП ГНЦ РФ ФЭИ (г. Обнинск) Московской обл.), с концентрацией по урану 5,4 г/см³. Испытания проведены до выгораний в экспериментальных твэлах 40 и 60 % без признаков разгерметизации. Проведены послереакторные исследования.

В результате на твэлах с 60 % выгоранием были обнаружены достаточно большие зоны взаимодействия топливных частиц U-9%Mo с алюминиевой матрицей, а также зоны расслоения топливного сердечника.

В настоящее время готовятся к испытаниям в реакторе МИР две полномасштабные ТВС типа ИРТ-3М с топливом в виде U-9%Mo+Al с концентрацией по урану 5,4 г/см³.

3-Й ЭТАП. РАЗРАБОТКА ТВЭЛОВ И ТВС НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РЕАКТОРОВ

По **третьему** этапу в ФГУП ВНИИНМ разработан универсальный стержневой твэл нового поколения, который должен обеспечить современный уровень исследовательских реакторов, разработанных по российским проектам, и их конкурентоспособность на международном рынке (рис. 5, 6, 7).

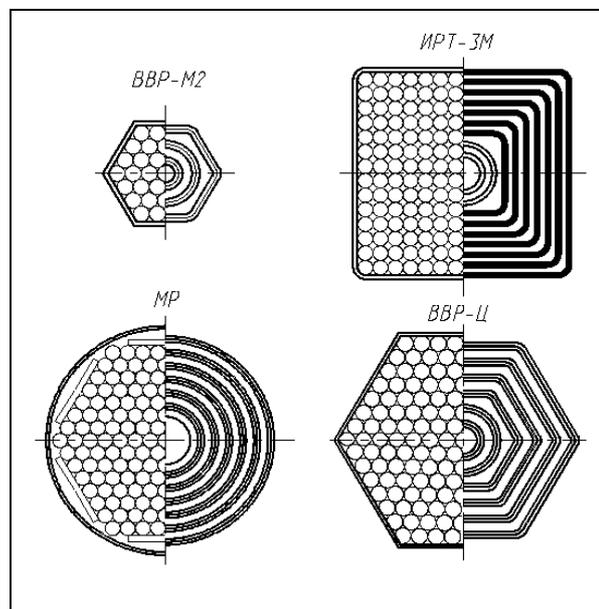


Рис. 5. Сечения различных типов ТВС исследовательских реакторов

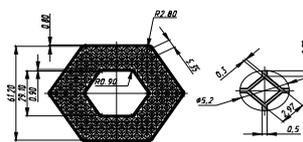


Рис. 6. Сечение ТВС типа ИВВ-2МС (90 твэлов)

Топливо российских исследовательских реакторов было разработано в СССР в начальный период развития этого направления. Было создано несколько типов реакторов (ВВР-М, МИР, ИРТ) и соответствующие типы твэлов и ТВС различной конструкции.

**РОСІЙСЬКА ПРОГРАМА ЗНИЖЕННЯ ЗБАГАЧЕННЯ ПАЛИВА
У ДОСЛІДНИЦЬКИХ РЕАКТОРАХ**

***V.G. Aden, E.F. Kartashev, V.A. Lukichev, P.I. Lavrenyuk, V.M. Chernishov,
A.V. Vatulin, A.V. Morozov, V.B. Suprun, A.B. Alexandrov, A.A. Enin***

Представлено основні результати робіт з російської програми зниження збагачення палива в дослідницьких реакторах і перспективи на майбутнє.

RUSSIAN PROGRAM ON DECREASE OF FUEL ENRICHMENT IN TESTING REACTORS

***V.G. Aden, E.F. Kartashev, V.A. Lukichev, P.I. Lavrenyuk, V.M. Chernishov, A.V. Vatulin,
A.V. Morozov, V.B. Suprun, A.B. Alexandrov, A.A. Enin***

Main results of Russian program on decrease of fuel enrichment in testing reactors are presented in the paper with the future perspectives.