

УДК 621.039.526

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ В РЕАКТОРЕ БОР-60

© 2019 г. И. Ю. Жемков^{1,*}, Н. С. Погляд^{1,2}, В. Ю. Анисимов^{1,2}, А. В. Боев^{1,2}

¹ Научно-исследовательский институт атомных реакторов, Димитровград, 433507, Россия

² Димитровградский инженерно-технологический институт –
филиал Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ”, Димитровград, 433511, Россия

*e-mail: Vlasya.85@mail.ru

Поступила в редакцию 18.03.2019 г.

После доработки 13.08.2019 г.

Принята к публикации 03.09.2019 г.

В настоящее время в реакторе БОР-60 проводится широкий спектр испытаний материалов, применяемых в ядерной энергетике. Исследование изменений свойств материалов требует определения с высокой точностью температурных условий облучения. В работе представлена сводная информация о материалах, которые испытывались в реакторе БОР-60 с момента пуска по настоящее время. Каждое из направлений исследований требует индивидуального подхода и создания уникального экспериментального устройства. Экспериментальные устройства различаются по различным критериям, которые оказывают влияние на эффективность проводимых исследований. Геометрические параметры ячеек реактора и особенности устройства напорного коллектора приводят к необходимости внешнего подобию применяемых устройств, при этом внутреннее исполнение значительно различается в зависимости от типа проводимых исследований. В работе представлена различная классификация экспериментальных устройств реактора БОР-60, отличающаяся по способу получения информации, уровню температуры облучения, конструктивному исполнению и среде испытаний, а также описано проведение в инструментированной ячейке реактора БОР-60 методического эксперимента. Для каждого типа облучательных устройств приведено описание особенностей конструкции и применения для проведения испытаний. Отдельно в работе описан автономный петлевой канал, позволяющий проводить испытания в средах, отличающихся от реакторного теплоносителя.

Ключевые слова: реактор, экспериментальное устройство, материаловедческий пакет, образцы, твэл, термопара, ядерное топливо, теплоноситель

DOI: 10.1134/S2304487X19050092

ВВЕДЕНИЕ

В опытном реакторе на быстрых нейтронах БОР-60 проводятся экспериментальные исследования (ЭИ) совместного влияния радиационного воздействия и температуры на структуру и свойства используемых в ядерной энергетике материалов. Для проведения ЭИ и последующего переноса полученных результатов на другие реакторы необходимо тщательное моделирование условий облучения, соответствующих реальным условиям эксплуатации материалов. Для решения этой задачи применяются специальные ЭУ, обеспечивающие требуемые условия облучения в течение всего срока испытаний в реакторе. ЭУ могут быть установлены в любую ячейку активной зоны и бокового экрана реактора БОР-60 (см. рис. 1). ЭУ отличаются по способу получения информации,

уровню температур облучения, конструктивному исполнению и среде испытаний.

Принципиальным различием ЭУ, оказывающим непосредственное влияние на процесс проведения испытаний, является конструктивное исполнение. Использование ЭУ различной конструкции позволяет проводить испытания образцов в различных средах, таких как натрий, различные газы и их смеси и тяжелометаллические теплоносители.

В табл. 1 представлены материалы, испытанные в БОР-60 в составе специальных ЭУ.

По конструктивному исполнению ЭУ могут быть разборными, что позволяет использовать их для продолжения испытаний после частичной или полной замены исследуемых образцов, и неразборными, в которых извлечение образцов

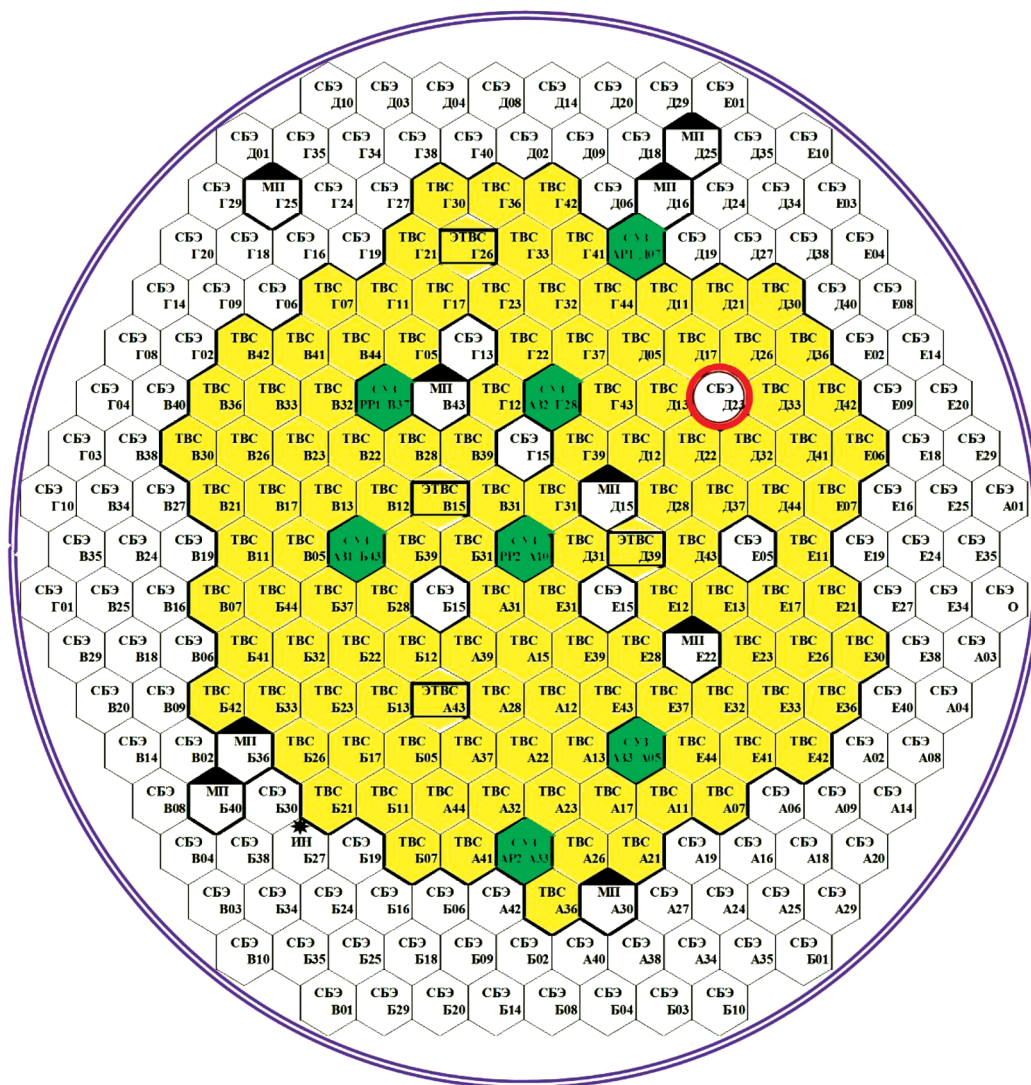


Рис. 1 – Картограмма загрузки реактора BOR-60.

ТВС – тепловыделяющая сборка, ЭТВС – экспериментальная ТВС, СУЗ – рабочий орган системы управления и защиты реактора, МП – материаловедческий пакет, СБЭ – стальная сборка бокового экрана.

предполагает нарушение целостности ЭУ и невозможность его дальнейшего использования.

Разборные ЭУ предполагают как дискретное, так и непрерывное облучение. В первом случае возможно получение информации в промежуточных точках облучения после разборки ЭУ, выгрузки части образцов и их исследований неразрушающими методами (с последующим возвратом в ЭУ) или разрушающими методами (без возврата на дооблучение). Результатом такого облучения является так называемая дозная зависимость исследуемого свойства испытываемого материала. При непрерывном облучении не предполагается получение промежуточной информа-

ции. Результатом такого облучения является сравнение исследуемого свойства материала в исходном состоянии и после облучения в реакторе.

Интерпретация данных, полученных в результате исследования образцов, зависит от условий облучения, определение которых является первоочередной задачей при подготовке и проведении реакторных испытаний. Существующая в реакторе BOR-60 информационно-измерительная система (ИИС) производит в режиме реального времени контроль нескольких сотен параметров реактора (расход, входная и выходная температура натрия, тепловая мощность реактора и др.). Все ЭУ перед началом облучения в реакторе проходят

Таблица 1. Материалы, испытанные в реакторе БОР-60

Материалы		Тип
Топливные	керамика	UO ₂ , UO ₂ –PuO ₂ , (U,Pu)O ₂ , UC, UN, UPuN, UPuCN, PuO ₂ –MgO, ЯТ + Np, Am
	металл	U, UPu, UZr, UPuZrNb, PuN–ZrN
	металлокерамика	PuO ₂ –U, UO ₂ –U, UO ₂ –PuO ₂ –U, UN–U
	композитное	(UPuZr)C, UO ₂ –NiCr
Поглощающие	образцы	B ₄ C, Ta, Hf, Dy, Sm, Gd, AlB ₆ , AlB ₁₂ , Eu ₂ O ₃ , HfH _x , Gd ₂ O ₃ , Dy ₂ O ₃ –HfO ₂
	стержни СУЗ	CrB ₂ , B ₄ C (¹⁰ B – 19–80%), Eu ₂ O ₃ , Eu ₂ O ₃ + ZrH ₂
	стали	OX18H9, X18H10T, ЭП450, ЭП823 03X16H9M2, ЭП912, ЭИ847, ЭП172, ЧС68, ВХ24, ЭП302Ш, 09Г2С, АРМКО, SS316, ODS-(12,14,18)Cr, Т91, Т92, S421 (HT9), 15-15Ti, 800H, 14YWT, 800H, ...
Конструкционные	тугоплавкие материалы	V, W, Mo, Nb, WC, SiC/SiC
	сплавы	РЕ-16, X20H45M4Б, ВЦУ, Э110, Э125, Э117, Э635, VCrTi, FeCr, ZrNbSnFeO
	замедлители	ГРП-2-125, МП6-6, ГР-280, АРВ, IG-11, ПГИ, ZrH _x
	источники нейтронов	Po–Be, Be, SbBe
Теплоносители	жидкометаллические	Na, Pb, Pb–Bi
Электротехнические	изоляция	Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , Si, слюда
	кабели	КТМС, КНМС(Н)
	магниты	ЮНДК
Прочие материалы	спец. керамика	ГБ-7, ИФ-46, ЦТС, LiNbO ₃
	биологическая защита	Бетоны различных марок

гидравлические испытания на специальном стенде, результатом которых является обеспечение требуемого расхода натрия через ЭУ при его постановке в определенную ячейку реактора, а также определение зависимости расхода теплоносителя через ЭУ от давления. Эта зависимость позволяет однозначно определить, используя показания ИИС, значения расхода теплоносителя через ЭУ в течение всего процесса облучения.

По способу получения информации о распределении температуры в облучательном объеме ЭУ можно разделить на инструментированные и неинструментированные.

Инструментированные ЭУ предназначены для проведения испытаний с контролем исследуемых параметров в on-line режиме в процессе облучения. В реакторе БОР-60 есть одна инструментированная ячейка (см. рис. 1), которая позволяет организовать вывод информации по 50 независимым каналам, к которым могут быть подключены различные детекторы и датчики. В частности, размещение ЭУ в инструментированной ячейке

позволяет определять распределение температуры в процессе проведения испытаний при помощи измерения показаний термопар, размещенных в облучательном объеме ЭУ. Именно в этой ячейке при проведении испытаний размещаются инструментированные ЭУ. К подобным ЭУ относятся автономные петлевые каналы, термометрические пакеты и разборные ЭУ с установленным термометрическим зондом.

Неинструментированные ЭУ позволяют проводить облучение без текущего контроля исследуемых параметров. Этот тип ЭУ используется для определения пострadiaционных эффектов в процессе последующих вне реакторных материаловедческих исследований. Особенностью этих ЭУ является возможность размещения в них образцов различных размеров или предназначенных для различных видов испытаний. Отсутствие термопар позволяет заполнить облучательный объем ЭУ большим количеством образцов, достаточным для применения при обработке результатов материаловедческих исследований методов мате-

матической статистики (т.е. представление результата как минимум с указанием его вероятной вероятности). Неинструментированные ЭУ могут оснащаться наборами активационных детекторов для послереакторного определения флюенса нейтронов и температурных мониторов для определения температуры облучения. В качестве температурных мониторов могут использоваться такие материалы, как карбид кремния, так и сплавы металлов с различной температурой плавления (плавкие мониторы).

К подобным ЭУ относятся экспериментальные ТВС (ЭТВС) без подогрева или с твэльным подогревом, а также материаловедческие пакеты (МП), с проточной или непроточной (ампульной) подвеской.

На реакторе БОР-60 широко применяются методические эксперименты в инструментированной ячейке. Во время данного эксперимента ЭУ с установленным термометрическим зондом подвергается кратковременному облучению в инструментированной ячейке реактора с целью экспериментального определения (подтверждения) распределения температуры в облучательном объеме, затем термометрический зонд отсоединяется, а ЭУ переставляется для дальнейшего облучения в другую неинструментированную ячейку реактора. Таким образом, начало облучения исследуемых материалов проводится в инструментированном ЭУ, а дальнейшее облучение в неинструментированном ЭУ. Данный подход существенно расширяет экспериментальные возможности реактора БОР-60.

КОНСТРУКЦИЯ ЭУ

Несмотря на многообразие типов ЭУ, устанавливаемых на облучение в реактор БОР-60, в их конструкции есть общие элементы. В основу конструкции всех ЭУ положены принципы исключения возможности нарушения пределов и условий безопасной эксплуатации в процессе установки в реактор, проведения испытаний, извлечения ЭУ из реактора и образцов из ЭУ.

Для размещения в реакторе ЭУ должно внешними габаритами соответствовать штатной ТВС. В каждом ЭУ образцы различных классов исследуемых материалов, различных форм и размеров, скомпонованные определенным образом, размещаются в шестигранном чехле (корпус ЭУ) размером “под ключ” 44 мм, включающем в себя верхний и нижний переходники, хвостовик штатной конструкции. Все ЭУ оснащены транспортной головкой, которая имеет шесть отверстий для выхода теплоносителя из ЭУ, а также служит для захвата штангой разгрузочно-загрузочной машины или ручным инструментом. Крепление головки к верхнему переходнику шестигранного чехла —

разъемное байонетное. В зависимости от требуемого расхода теплоносителя через ЭУ его хвостовик может обеспечивать поступление теплоносителя (натрий) в устройство либо из камеры высокого давления напорного коллектора БОР-60 через отверстия на боковой поверхности, либо из камеры низкого давления напорного коллектора БОР-60 через торцевое отверстие. Величина расхода теплоносителя через ЭУ, необходимая для обеспечения требуемых температурных условий облучения, определяется расчетным путем. Затем на специальном стенде проводятся гидравлические испытания, в результате которых подбирается проходное сечение специальной дроссельной шайбы, устанавливаемой в хвостовик, соответствующее требуемому значению расхода теплоносителя через ЭУ при номинальном расходе теплоносителя через реактор. В зависимости от типа ЭУ используются различные подвески с исследуемыми образцами, которые размещаются внутри корпуса. Однако каждый из типов подвесок обеспечивает протекание теплоносителя через внутренний объем ЭУ в количестве, достаточном для надежного охлаждения элементов конструкции ЭУ.

В отдельных конструкциях корпус ЭУ может состоять из двух чехлов, образующих герметичную полость, заполненную смесью аргона и воздуха. При этом наружный чехол всегда выполняется из шестигранной трубы с размером “под ключ” 44 мм, а внутренний — либо из шестигранной трубы меньшего размера, либо из круглой трубы. Заполненная смесью газов полость служит в этом случае тепловой защитой для минимизации вклада соседних ТВС в температурный режим облучения исследуемых образцов. В результате полезный объем в облучательном устройстве существенно уменьшается, что является одним из основных факторов, ограничивающих экспериментальные возможности БОР-60.

Дополнительными ограничивающими факторами являются необходимость изготовления измерительных датчиков из термостойких материалов и невозможность проведения испытаний материалов при температуре ниже 320°C, что связано с эксплуатационными параметрами реактора БОР-60.

На рис. 2 представлена блок-схема типов ЭУ. Рассмотрим подробнее основные типы используемых ЭУ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТВС

ЭТВС реактора БОР-60 предназначена для облучения экспериментальных твэлов или макетов твэлов различных геометрических размеров и с различным ядерным топливом. В ЭТВС также возможно высокотемпературное облучение (390—

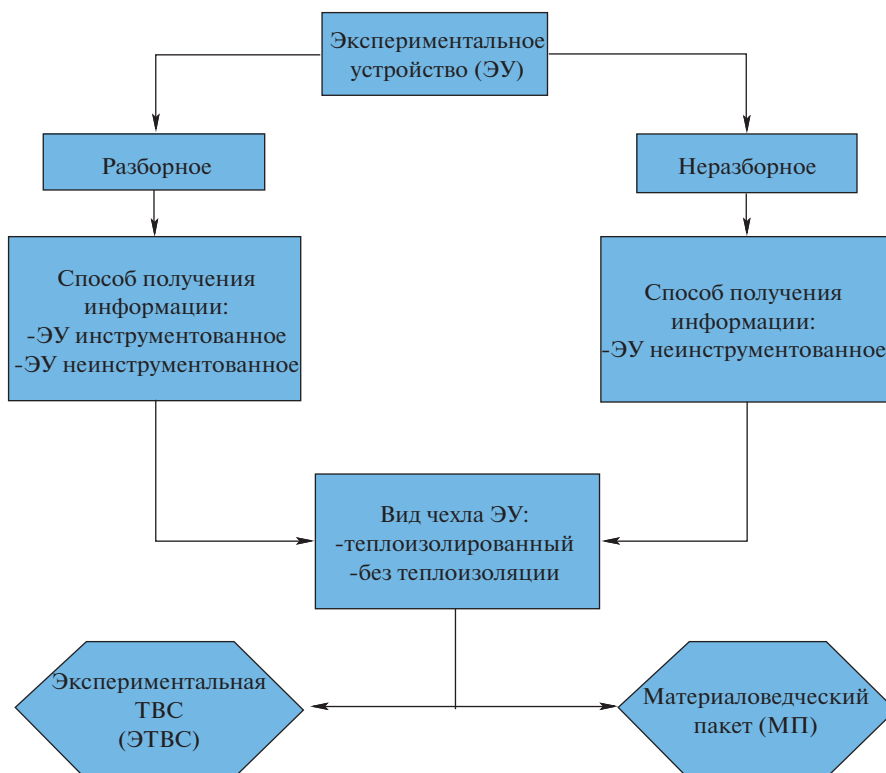


Рис. 2. Схема ЭУ реактора BOR-60.

650°C) образцов конструкционных материалов с применением твэльного подогрева [2, 3]. На рис. 3 приведена блок-схема типов ЭТВС отличающихся по типу подвески.

ЭТВС состоит из чехла с переходником и хвостовиком, транспортной головки и дистанционирующей решетки, расположенной в верхней части устройства. Дистанционирующая решетка предназначена для сборки твэлов в пучок и установки в ЭТВС в условиях защитной камеры. В зависимости от температуры облучения и местоположения в реакторе возможно использовать чехол ЭТВС без теплоизоляции или двойной чехол, имеющий теплоизолирующую полость.

При проведении реакторных испытаний поток теплоносителя реактора, через отверстия в хвостовике, попадает во внутреннюю полость корпуса и образует поток, который омывает твэлы, охлаждая их до заданной температуры. Возможно разделение потока на два, что обеспечит разные температурные условия облучения. При наличии в подвеске твэльного нагревателя, который расположен в нижней части ЭТВС, теплоноситель подогревается до заданной температуры. Затем этот поток контактирует с поверхностью образцов или экспериментальных твэлов, обеспечивая требуемые температурные условия облучения. В

верхней части ЭТВС поток теплоносителя через отверстия в головке выходит из внутренней полости.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЙ ПАКЕТ (МП)

Материаловедческий пакет (МП) — вид ЭУ, предназначенный для облучения образцов сталей, сплавов, поглотителей, замедлителей и других материалов, не содержащих делящихся нуклидов. На рис. 4 приведена блок-схема МП, различающихся по типу подвески.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЙ ПАКЕТ С ПРОТОЧНОЙ ПОДВЕСКОЙ

Подвеска проточного материаловедческого пакета собрана из нескольких кассет. В донных и боковых обечайках кассет выполнена перфорация для прохода теплоносителя. В кассетах размещаются образцы различных исследуемых материалов. Образцы конструкционных материалов при этом выполняются, в основном, в соответствии со стандартами для соответствующих механических испытаний (растяжение, излом, трещиностойкость, ударная вязкость и т.д.). Также в составе подвесок могут использоваться короткие трубчатые образцы, заполненные газовой

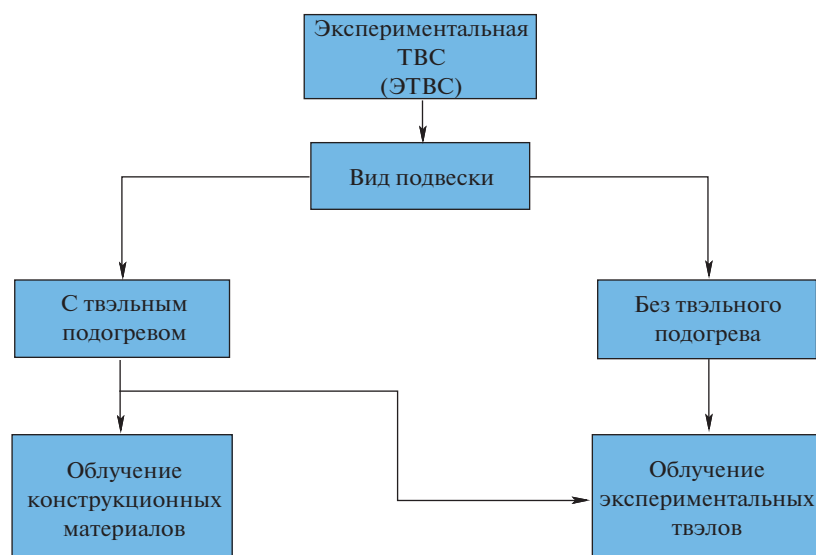


Рис. 3. Схема ЭТВС, различающихся по типу подвески.

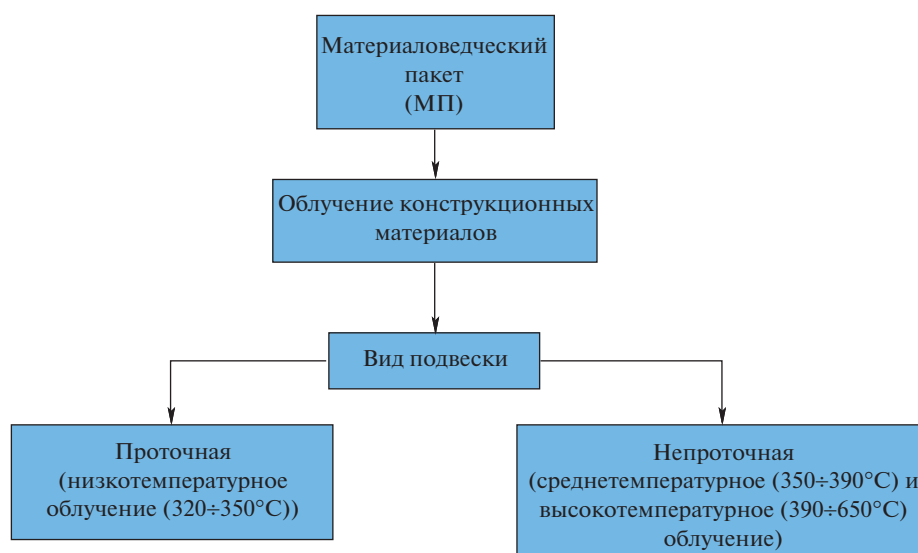


Рис. 4. Схема МП, различающихся по типу подвески.

средой под давлением, для испытаний под нерегулируемой нагрузкой.

При низкотемпературных испытаниях в реакторе подвеска устанавливается в корпус ЭУ с двойным чехлом и теплоизолирующей полостью.

При проведении реакторных испытаний поток теплоносителя первого контура реактора, через отверстия в хвостовике, попадает во внутреннюю полость корпуса и образует поток, который контактирует с поверхностью кассеты и образцами,

обеспечивая требуемые температурные условия облучения. В верхней части ЭУ поток теплоносителя через отверстия в головке выходит из внутренней полости.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЙ ПАКЕТ С НЕПРОТОЧНОЙ (АМПУЛЬНОЙ) ПОДВЕСКОЙ

Конструкция ампульного ЭУ дополнительно содержит, кроме внешнего штатного чехла, две

оболочки, коаксиально вложенные одна в другую и герметично соединенные в верхней части. Образованный двумя оболочками объем для обеспечения теплоизоляции заполняется газом [4]. Такая теплоизолированная ампула может быть изготовлена в двух вариантах — с открытым верхом и герметичным верхом. Геометрические параметры теплоизолирующего объема и состав газа или смеси определяются в результате специальных расчетов на стадии разработки конструкции ЭУ. Кассеты с образцами помещаются внутрь теплоизолированной ампулы. В случае открытого верха ампулы подвеска с образцами может извлекаться для проведения промежуточных исследований и такая конструкция ЭУ является разборной. В реализации герметичного верха ампулы ЭУ неразборное, однако герметичный верх позволяет снизить торцевую утечку тепла из внутреннего объема ампулы и таким образом проводить испытания при более высоких значениях температуры образцов.

Поток теплоносителя при облучении образцов в ЭУ не контактирует напрямую с исследуемыми образцами, что позволяет значительно уменьшить неравномерность распределения температуры по облучаемому объему. Недостатками ампульных ЭУ являются существенное усложнение конструкции и уменьшение облучаемого объема.

АВТОНОМНЫЙ ПЕТЛЕВОЙ КАНАЛ

Автономные петлевые каналы (АПК) можно отнести к отдельному классу ЭУ. АПК позволяют проводить испытания макетов твэлов быстрых реакторов в средах, соответствующих по типу и составу реальным условиям эксплуатации [1]. АПК представляет собой длинномерную ампулу, устанавливаемую в инструментрованную ячейку реактора БОР-60 с выводом наружу из реактора коммуникаций и электродвигателя насоса. Конструкция канала обеспечивает разделение центрального и периферийного объемов теплоизолирующим зазором, который заполняется газовой смесью различного состава.

Центральный объем канала, предназначенный для размещения исследуемых макетов твэлов, представляет собой полость, герметично изолированную от реакторного теплоносителя. Эта полость заполнена теплоносителем, тип и состав которого могут быть различными. Циркуляция теплоносителя внутри центрального объема автономного канала осуществляется, как правило, по схеме Фильда и обеспечивается специальным насосом. Электродвигатель насоса размещается над верхней плитой поворотных пробок реактора.

Проточный периферийный объем АПК обеспечивает отведение теплоты от центрального объ-

ема реакторным теплоносителем для обеспечения требуемых условий облучения макетов твэлов.

Для обеспечения требуемых условий испытаний каждый АПК имеет уникальную конструкцию, создание которой является итерационным процессом из конструирования и расчетных исследований. Результатами этого процесса являются определение геометрических параметров элементов канала, числа исследуемых макетов твэлов, расход реакторного теплоносителя через периферийный объем и состав газовой смеси в теплоизолирующей полости.

В процессе испытаний расход теплоносителя в центральном объеме может варьироваться за счет изменения оборотов электродвигателя насоса. При этом термодары, размещенные по объему АПК, позволяют контролировать температурные условия облучения макетов твэлов в режиме реального времени. Использование подобного подхода делает возможными как стационарные, так и динамические испытания твэлов в условиях, наиболее точно моделирующих реальную эксплуатацию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в реакторе БОР-60 проводится широкий спектр испытаний различных типов конструкционных материалов, поглотителей, замедлителей и ядерного топлива. Каждое из направлений исследований требует индивидуального подхода и создания уникального ЭУ, обеспечивающих требуемые условия облучения.

Накопленный за многолетнюю историю эксплуатации опыт проведения облучения в реакторе БОР-60 делает возможным выбор наиболее подходящего типа ЭУ под каждую задачу, при этом надежность получаемых данных подтверждается расчетно-экспериментальными исследованиями.

Использование накопленного многолетнего опыта расчетно-экспериментальных исследований на реакторе БОР-60, разработанных и примененных конструкций ЭУ, а также создание новых типов ЭУ позволит максимально использовать экспериментальные возможности реактора и проводить новые исследования практически по всем перспективным направлениям развития ядерной энергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кордюков А.Г., Леонов В.Н., Пикалов А.А. Испытания макетов твэлов реактора БРЕСТ-ОД-300 в автономном свинцово-охлаждаемом канале БОР-60 // Атомная Энергия, 2004. Т. 97. № 2. С. 131–138.

2. Ерёмин С.Г., Жемков И.Ю., Плотников А.И. Устройство с твэльным подогревом теплоносителя для облучения материалов в ядерном реакторе // Патент РФ № 2524683. 2014. Бюл. № 22.
3. Varivtsev A.V., Zhemkov I.Yu., Boev A.V., Ishunina O.V., Naboyshchikov Yu.V., Poglyad N.S., Sharonova M.G. Computational and experimental study of an irradiation rig with a fuel heater for the BOR-60 reactor // Nuclear Energy and Technology, 2016. № 2. P. 126–131.
4. Варивцев А.В., Жемков И.Ю., Козолуп А.Н., Погляд Н.С., Вострецов Д.Я. Расчетно-экспериментальные исследования в обоснование температурных условий облучения конструкционных материалов в реакторе БОР-60 // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 4. С. 990–995.

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI", 2019, vol. 8, no. 5, pp. 402–409

Experimental Devices for Testing in the BOR-60 Reactor

I. Yu. Zhemkov^a, N. S. Poglyad^{a,b}, V. Yu. Anisimov^{a,b,#}, and A. V. Boev^{a,b}

^a Research Institute of Atomic Reactors, Dimitrovgrad, 433510 Russia

^b Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute,

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Dimitrovgrad, 433510 Russia

[#]e-mail: Vlasya.85@mail.ru

Received March 18, 2019; revised August 2, 2019; accepted August 27, 2019

Abstract—At present, a wide range of tests of materials used in nuclear power engineering is carried out in the BOR-60 reactor. The study of changes in the properties of materials requires the determination of temperature irradiation conditions with high accuracy. The materials that have been tested in the BOR-60 reactor from the start up to the present are summarized in this work. Each of the research areas requires an individual approach and the creation of a unique experimental device. Experimental devices differ in various criteria that affect the efficiency of the research. The geometrical parameters of the cells of the reactor and the characteristics of the pressure collector require external similarity of the devices used, and the internal design varies considerably depending on the type of research conducted. Various classifications of experimental devices of the BOR-60 reactor differing in the method of obtaining information, in the irradiation temperature, and in the design and testing environment are presented. In addition, a methodical experiment conducted in the instrumented cell of the BOR-60 reactor is described. For each type of irradiation devices, the design features and test applications are discussed. An autonomous loop channel that allows testing in environments different from the reactor coolant is described separately.

Keywords: reactor, experimental device, material test rig, samples, fuel elements, thermocouple, nuclear fuel, coolant

DOI: 10.1134/S2304487X19050092

REFERENCES

1. Cordyukov A.G., Leonov V.N., Pikalov A.A. *Ispitaniya maketov tvelov reaktora BREST-OD-300 v avtonomnom svintsovo-ohlazhdaemom kanale BOR-60* [Studying of BREST-300 fuel pins into autonomic lead-cooled BOR-60 irradiation channel]. Atomnaya energiya. 2004, v. 97, № 2, pp. 131–138 (in Russian).
2. Eremin S.G., Zhemkov I.Yu., Plotnikov A.I. *Ustroistvo s tvelnim podogrevom teplonositelya dlya oblucheniya materialov v yadernom reaktore* [Irradiation rig with a fuel heater for irradiation materials in a nuclear reactor]. Patent RF, no. 2524683, 2014 (in Russian).
3. Varivtsev A.V., Zhemkov I.Yu., Boev A.V., Ishunina O.V., Naboyshchikov Yu.V., Poglyad N.S., Sharonova M.G. Computational and experimental study of an irradiation rig with a fuel heater for the BOR-60 reactor. // Nuclear Energy and Technology. 2016, no. 2, pp. 126–131.
4. Varivtsev A.V., Zhemkov I.Yu., Kozolup A.N., Poglyad N.S., Vostretsov D.Ya. *Raschetno-eksperimental'nie issledovaniya v obosnovanie temperaturnih uslovij oblucheniya konstruktivnykh materialov v reaktore BOR-60* [Computational and experimental study of temperature irradiation condition of construction materials in the BOR-60 reactor]. Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN., 2012, vol. 14. № 4 (4), pp. 990–995 (in Russian).