

ОТЛАДКА И РЕСУРСНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПОЛНОМАСШТАБНОГО МАКЕТА ПРОБООТБОРНИКА РУ БРЕСТ-ОД-300

Гордиенко А.С., Моркин М.С., Евстафьев А.М., Хижняк А.Г.,
Михайлов А.В., Шутов Б.С. (АО «НИКИЭТ», Москва, Россия)

Введение

Инновационная реакторная установка (РУ) БРЕСТ-ОД-300 на быстрых нейтронах, обладающая свойством «естественной безопасности», войдет в состав сооружаемого в настоящее время опытно-демонстрационного энергокомплекса [1]. Эксплуатация этого объекта позволит продемонстрировать возможность и эффективность перехода к ядерной энергетике нового типа, обеспечивающего замыкание ядерного топливного цикла с исключением возможности негативного радиационного воздействия на население и окружающую среду.

Конструктивно РУ БРЕСТ-ОД-300 является установкой на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем и характеризуется интегральной компоновкой оборудования первого контура, включающего активную зону, восемь парогенераторов, четыре главных циркуляционных насосных агрегата, а также технологическое оборудование.

В проекте РУ заложены необходимые системы для контроля герметичности оболочек ТВЭЛОВ [2], в том числе, предусмотрены средства контроля реперных радионуклидов-продуктов деления в свинцовом теплоносителе.

При работе РУ на мощности будет производиться периодический отбор проб теплоносителя. Проба отбирается в виде слитка, который передается в радиохимическую лабораторию энергоблока для выполнения необходимых измерений активности.

1. Описание конструкции пробоотборника

Отбор пробы теплоносителя обеспечивается пробоотборником [3, 4], представляющим собой автоматизированный комплекс, включающий механическую и программно-техническую части. На рисунке 1 показан состав механической части пробоотборника, включая:

- 1) электронагреватель (поз. 1);
- 2) трубку транспортировки капилляра (ТТК) (поз. 2);
- 3) газовый затвор (поз. 3), включающий:
 - а) тройник для подачи чистого аргона (поз. 4);
 - б) шибер (поз. 5);
 - в) устройство уплотнения капилляра (поз. 6);
- 4) капилляр пробоотборный (поз. 7);
- 5) механизм транспортировки капилляра (МТК) (поз. 8), включающий:
 - а) устройство подачи капилляра (поз. 9);
 - б) катушку для намотки капилляра (поз. 10);
 - в) раму механизма (поз. 11, на схеме показана условно).

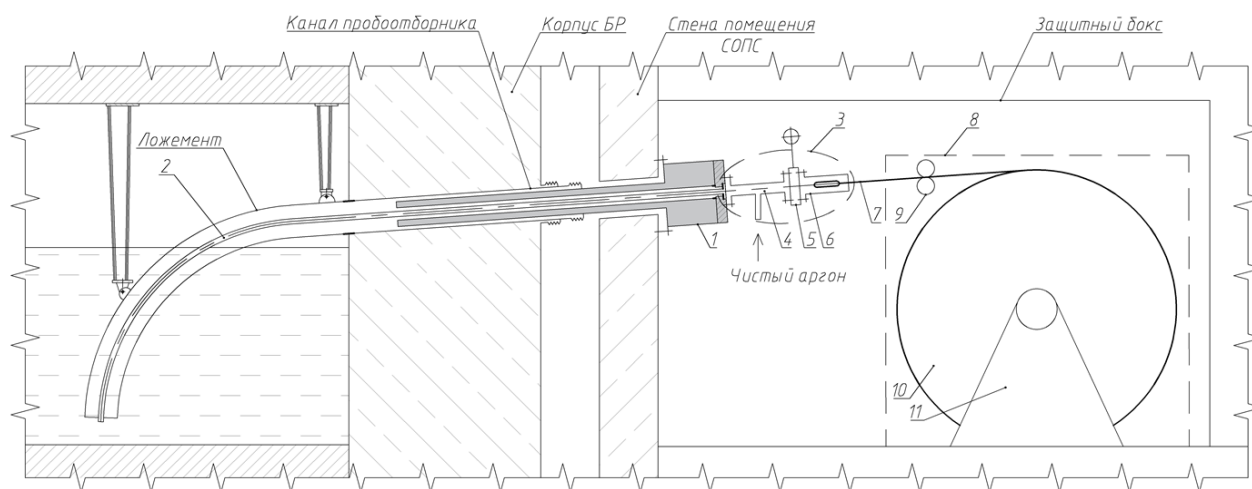


Рис.1. Схема конструкции пробоотборника

Отбор пробы выполняется через наклонный боковой канал, проходящий через корпус РУ выше уровня теплоносителя, и через соосную с каналом проходку в стене шахты реактора. При этом проба в автоматическом режиме транспортируется в соседнее с РУ помещение, где установлен защитный бокс для ее извлечения оператором.

Отбор пробы осуществляется с помощью разъемной капсулы с герметизирующим шариком внутри, при этом требуемый перепад давления создается и поддерживается упруго изгибающимся капилляром [3, 5], разматываемым с катушки. Подача капилляра в ТТК осуществляется через подвижное уплотнение, входящее в состав устройства уплотнения капилляра.

Процесс отбора пробы осуществляется с компьютера. Алгоритм отбора пробы включает открытие шибера, продувку аргоном трубки транспортировки капилляра, контролируемое автоматическое перемещение пробоотборного капилляра с капсулой к точке отбора свинца (подача), автоматическое создание и поддержание перепада давления на капсуле для отбора и удержания пробы свинца, автоматическое перемещение (извлечение) пробоотборного капилляра с доставкой капсулы к месту извлечения пробы, закрытие шибера.

Точка отбора пробы находится около выхода потока СТ из ГЦН. Заглубление точки отбора ниже уровня СТ исключает смешивание пробы с приповерхностными слоями СТ, что является положительным свойством конструкции, поскольку в случае появления в СТ посторонних включений или шлаков, они будут всплывать к поверхности.

Подача/извлечение капилляра обеспечивается двумя электрическими мотор-редукторами: для привода ведущего ролика (М1) и привода катушки (М2).

Подачу капсулы с капилляром выполняет мотор-редуктор М1 (рис. 1, 2). При этом мощность мотора М1 тратится на преодоление сил трения капсулы с капилляром о стенки ТТК, а также трение в подвижном уплотнении. Работа М2 при этом обеспечивает размотку подаваемого капилляра с заданной скоростью, исключаяющей его провисание и перегиб.

2. Испытания макета пробоотборника

Ранее были выбраны основные компоновочные решения пробоотборника, отработан способ отбора и удержания расплава в капсуле пробоотборного капилляра,

испытан макет электронагревателя [6], предназначенного для устранения возможных засоров свинцом трубки транспортировки пробоотборного капилляра с капсулой [4, 7].

На завершающих этапах разработки технического проекта пробоотборника РУ БРЕСТ-ОД-300 выполнены испытания полномасштабного макета пробоотборника для проверки всех функций автоматизированного пробоотбора и стенд [8] для проведения испытаний, см. рисунок 2.

Стенд включал в себя полномасштабный имитатор наклонного канала с изогнутым участком. Электронагреватели обеспечивали температуру, соответствующую рабочей температуре изогнутой части канала пробоотборника в условиях РУ БРЕСТ-ОД-300. В составе стенда предусмотрен и газовый щит для проверки функции поддержания перепада давления на капсуле.

Макет включал в себя все элементы пробоотборника по рисунку 1, кроме электронагревателя, макет которого испытан ранее. Аппаратная часть макета пробоотборника обеспечивала контроль и управление всеми функциями пробоотборника в автоматическом режиме, а также в режиме ручного управления через портативный компьютер – см. рисунок 3.



*Рис.2. Общий вид макета пробоотборника и стенда:
а – макет МТК; б – нагреваемая изогнутая часть имитатора канала
пробоотборника стенда МТК*



*Рис. 3. Общий вид программно-технического комплекса:
а – рабочее место оператора; б – электрический шкаф стенда МТК*

Конструкция узла уплотнения оптимизировалась при испытаниях подбором одного из нескольких вариантов конструкции. Для снижения трения в подвижном уплотнении капилляра применен податливый упругий элемент, регулируемый подбором усилия затяжки гайки, см. рисунок 4.



Рис. 4. Процесс сборки подвижного уплотнения капилляра

В таблице 1 приведены данные измерений параметров электродвигателей при работе механизма. Из таблицы видно, что на преодоление трения в уплотнении расходуется не более 15 % мощности электродвигателей. Потребляемая мощность М2 при подаче капилляра отличается от потребляемой мощности при холостом ходе этого мотор-редуктора не больше, чем на погрешность измерений, оцениваемую в 0,03 Вт. Данное значение не превышает расчетную мощность на преодоления трения капилляра с капсулой в протяженном изогнутом канале для нормальных условий. Таким образом, существенного увеличения трения при нагреве ТТК до рабочей температуры пробоотборника РУ БРЕСТ-ОД-300 не наблюдалось.

Таблица 1

Характеристики токов и напряжений мотор-редукторов

Режим	Мотор-редуктор на катушке		Мотор-редуктор на роликах	
	Подача	Извлечение	Подача	Извлечение
С уплотнением				
Ток, А	$0,30 \pm 0,00$	$0,35 \pm 0,01$	$0,95 \pm 0,02$	$0,65 \pm 0,01$
Напряжение, В	$3,0 \pm 0,0$	$2,9 \pm 0,0$	$23,7 \pm 0,1$	$20,0 \pm 0,1$
Потребляемая мощность, Вт	$0,900 \pm 0,022$	$1,015 \pm 0,022$	$22,515 \pm 0,024$	$13,000 \pm 0,026$
Без уплотнения				
Ток, А	$0,3 \pm 0,00$	$0,30 \pm 0,00$	$0,9 \pm 0,02$	$0,6 \pm 0,01$
Напряжение, В	$3,0 \pm 0,0$	$2,9 \pm 0,0$	$23,7 \pm 0,1$	$20,2 \pm 0,1$
Потребляемая мощность, Вт	$0,900 \pm 0,022$	$0,870 \pm 0,022$	$21,330 \pm 0,025$	$12,120 \pm 0,026$
Ток холостого хода мотора-редуктора на роликах: при подаче капилляра – 0,9 А, при извлечении капилляра – 0,6 А				

Функция автоматизированного создания и поддержания перепада давления на капсуле при ее перемещении обеспечивается при поддержании в ТТК заданного избыточного давления, в том числе при движении капилляра. Поддержание давления обеспечивается автоматизированным газовым щитом, осуществляющим контроль давления и компенсацию допускаемых утечек аргона через подвижное уплотнение.

При перемещении капилляра с капсулой контролируется ее местоположение, что позволяет аппаратной части пробоотборника останавливать капсулу в нижнем положении, имитирующем точку отбора пробы свинца, и в верхнем положении – в устройстве уплотнения, где предусмотрена съемная крышка для доступа оператора к капсуле для ее извлечения. При нештатном застревании капсулы в любом другом положении формируется соответствующий сигнал об ошибке. Измерение положения осуществлялось пересчетом показаний абсолютного энкодера угла поворота вала катушки с учетом радиуса обода катушки. Необходимая точность измерения положения

капсулы достигается при отсутствии значимого прогиба капилляра на участке от катушки намотки капилляра до подающих роликов. Отсутствие прогиба достигалось подбором скоростей вращения электродвигателей постоянного тока М1 и М2. Для регулировки М2 применен специальный блок управления электромотором, настраиваемый с компьютера (один раз при наладке). Для регулировки М1 применялся переменный резистор, включенный в цепь питания. Переменный резистор также требует однократной регулировки при наладке. Таким образом, требуемое снижение скоростей вращения электродвигателей обеспечивалось подбором напряжения питания [9], подобранные напряжения показаны выше в таблице 1.

Кроме того, по сигналу энкодера контролируется скорость движения капсулы и, в случае ее резкого снижения, формируется сигнал о застревании с одновременным отключением двигателей и блокировкой валов механизма. Для исключения ложных сигналов о застревании необходимо исключать возможность люфта катушки относительно вала, вращаемого мотор-редуктором.

Данные о положении, скорости и ускорении капсулы, а также давлении в трубке транспортировки капилляра и в самом капилляре отображаются и архивируются специальным программным обеспечением, которое установлено на компьютер. При испытаниях по проверке точности позиционирования капсулы на макете достижение капсулой заданного положения проверялось оператором. Достижение капсулой крайнего нижнего положения проверялось щупом через открытое для этой серии испытаний нижнее отверстие в наконечнике ТТК. Достижение верхнего положения фиксировалось визуально при снятой крышке устройства уплотнения капилляра – см. рисунок 5, при этом линейкой измерялось расстояние от капсулы до специально нанесенной риски.

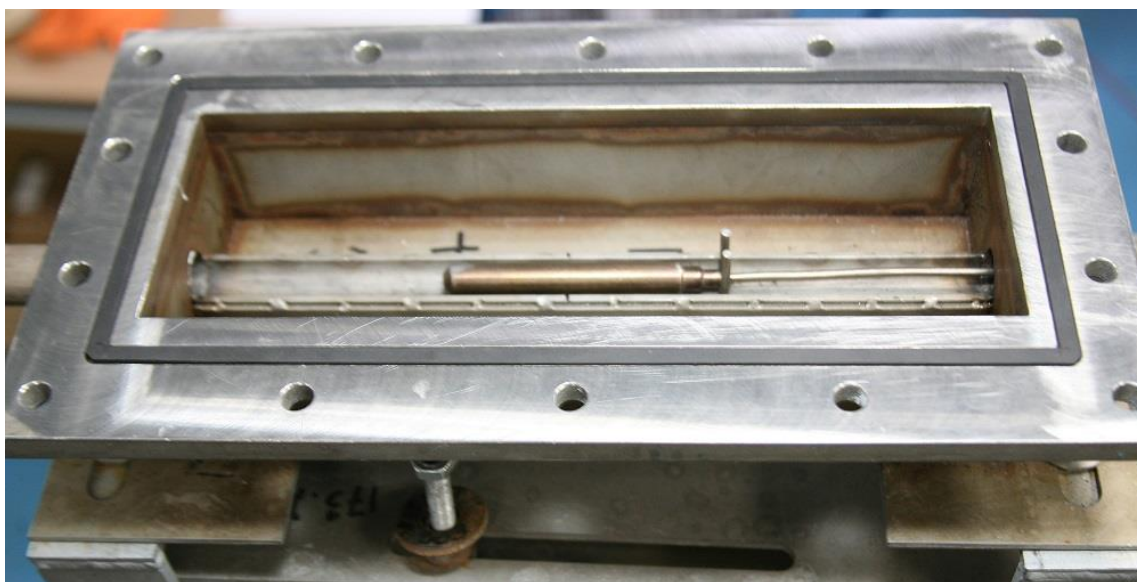


Рис. 5. Размещение капсулы в макете корпуса узла уплотнения капилляра

Расчет абсолютной погрешности по экспериментальным данным в соответствии с программой и методикой [1] осуществлялся по формуле (индекс «хол» означает испытания с холодной изогнутой частью ТТК):

$$\overline{\Delta}_{\text{хол}} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i\text{ПК}} - x_{i\text{рис}})}{n} \quad (1)$$

где $x_{i\text{ПК}}$ – i -е измеренное значение поданной/извлеченной длины капилляра по показаниям ПК;

$x_{i\text{рис}}$ – i -е измеренное значение поданной/извлеченной длины капилляра по показаниям «риски»;

n – количество измерений (в нашем случае $n=20$).

В ходе испытаний была достигнута требуемая точность в определении положения капсулы в трубке транспортировки капилляра – относительная погрешность измерения положения капсулы не превышает 0,01%.

Во время пуско-наладочных работ важно было убедиться, что ПТК при его эксплуатации осуществляет в автоматическом режиме самоконтроль исправности собственных технических средств, контроль измеряемых параметров, а также правильность выполнения заданных алгоритмов. Для этого были имитированы проблемы – ручной останов капилляра, попытка отбора пробы без наличия подвижного уплотнения капилляра, попытка отбора пробы с провисшим капилляром, путем задания разных линейных скоростей подачи капилляра на двигателях ролика и катушки. Во всех случаях система срабатывала успешно – система оповещала именно об ожидаемых ошибках, заложенных в алгоритм программного обеспечения.

Заключение

В ходе проведения ресурсных испытаний было выполнено 150 успешных циклов перемещения капилляра в автоматическом режиме работы макета МТК в условиях, максимально приближенных к проектным параметрам пробоотборника при его эксплуатации на РУ БРЕСТ-ОД-300. В каждом цикле воспроизводилось открытие шибера, продувка, поддержание заданного рабочего давления, перемещение пробоотборного капилляра к точке отбора пробы, создание и поддержание перепада давления (которое потребуется для набора и удержания пробы свинцового теплоносителя), закрытие шибера, архивация изменения контролируемых параметров систем.

Таким образом, в ходе испытаний макета пробоотборника подтверждена работоспособность и надежность выбранной конструкции пробоотборника, который должен обеспечить необходимый объем контроля СТ при эксплуатации РУ БРЕСТ-ОД-300.

Список литературы

1 Е.О. Адамов, А.В. Каплиенко, В.В. Орлов, В.С. Смирнов, А.В. Лопаткин, В.В. Лемехов, А.В. Моисеев. Быстрый реактор со свинцовым теплоносителем БРЕСТ: от концепции к реализации технологии. Атомная энергия. Том 129, № 4, М. 2020

2 Драгунова А.В. Особенности методов контроля герметичности оболочек твэлов реакторов на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем / А.В. Драгунова, М.С. Моркин, В.В. Перевезенцев // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2021. – № 3. – С. 84–96. – DOI 10.26583/пре.2021.3.07. – EDN HEQVIX.

3 Гуров В.А., Моркин М.С., Ярмоленко О.А. Устройство для отбора проб расплавленного металла. Патент на изобретение RU 2625244 C1, 12.07.2017. Заявка № 2016137055 от 15.09.2016.

4 Ярмоленко О.А., Моркин М.С., Бажанов А.А., Дербенева Н.В. Технический проект пробоотборника РУ БРЕСТ-ОД-300. В сборнике: Научно-технический годовой отчет НИКИЭТ-2019. сборник статей. Москва, 2019. С. 21–23.

5 Гуров В.А., Моркин М.С., Ярмоленко О.А., Лемехов В.В. Устройство для отбора проб расплавленного металла. Патент на изобретение RU 2640240 C1, 27.12.2017. Заявка № 2017108849 от 16.03.2017.

6 Ярмоленко О.А., Моркин М.С., Поздняков Г.С., Дерябин А.Ю., Крылов С.Г., Сапожников И.С., Тутукин А.В., Рахманов А.П., Шиверский Е.А. Обоснование макета электронагревателя пробоотборника РУ БРЕСТ-ОД-300. Научно-технический годовой отчет. М. 2022.

7 Дерябин А.Ю., Лавренов Р.Н., Моркин М.С., Ярмоленко О.А., Алёшин А.В., Юрманов Е.В., Шутько К.И. Обоснование конструкции пробоотборника РУ БРЕСТ-ОД-300. В сборнике: Научно-технический годовой отчет НИКИЭТ-2019. сборник статей. Москва, 2019. С. 23–25.

8 Гордиенко А.С., Моркин М.С., Курков С.Д., Евстафьев А.М., Кондрашин Д.А., Хижняк А.Г., Рыков Р.А., Ярмоленко О.А. Подготовка к испытаниям полномасштабного макета пробоотборника РУ БРЕСТ-ОД-300. Научно-технический годовой отчет. М. 2022.

9 Кенио Т., Нагамори С., Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 184 с.