

Российский Научный Центр "Курчатовский Институт" Институт Ядерных Реакторов

Конин Д.И., Митин В.И., Ковель А.И.

Преобразователи термоэлектрические специального назначения. Некоторые особенности разработки и опыт 10-летней эксплуатации на АЭС с ВВЭР.

АННОТАЦИЯ

В статье в сжатой форме представлены материалы по разработке и внедрению на АЭС с ВВЭР термоэлектрического преобразователя, ориентированного для системы внутриреакторного контроля.

Термоэлектрический преобразователь специального назначения в отличие от термопреобразователя общепромышленного назначения более полно отвечает специфическим требованиям при контроле температуры на объектах новой техники. Показано, что термопара из неблагородного материала может быть использована в составе датчика температуры повышенной точности при длительной эксплуатации и способна конкурировать с платиновым термометром сопротивления в области температур до 400°C. Разработчиком и изготовителем данного термопреобразователя является коллектив сотрудников, непосредственно связанных с разработкой и модернизацией системы внутриреакторного контроля «Гиндукуш» реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000.

1. ВВЕДЕНИЕ

Преобразователь термоэлектрический специального назначения (далее по тексту термоэлектрический преобразователь) был разработан в Институте Атомной Энергии им. И.В. Курчатова (в настоящее время Российский Научный Центр «Курчатовский институт») в 1991 [1] с целью обеспечения пускового объекта (4 блок Балаковской АЭС) комплектом термоэлектрических преобразователей. Термоэлектрический преобразователь имел два назначения:

- 1) за номером 5609.000 для измерения температуры теплоносителя в холодной и горячей нитках ГЦТ;
- 2) за номером 5610.000 для измерения температуры теплоносителя в ТВС на выходе из активной зоны (в каналах «ТК») реактора ВВЭР-1000 (тип В-302, В-320, В-338). Оба исполнения разрабатывались взамен термоэлектрических преобразователей ТХА-2076 [2] и предназначались для работы в составе системы внутриреакторного контроля (СВРК) «Гиндукуш» (с программным обеспечением, допускающим работу термоэлектрических преобразователей с пассивным выравниванием и контролем температуры свободных концов и введением индивидуальной поправки, определяемой в процессе калибровки в изотермическом режиме РУ при температуре 260-280°C).

2. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Вновь разработанный термоэлектрический преобразователь, как и ТХА-2076, имеет в основе кабельную термопару типа «К» с радиационно-стойкими термоэлектродами [3] из сплавов никель-хром/никель-алюминий [3,4], подвергаемую процессу стабилизации термоэДС для рабочего диапазона измерения (до 400°C).

Отличительной особенностью разрабатываемого преобразователя, по сравнению с ТХА-2076, является:

1. Индивидуальная калибровка (градуировка) в диапазоне от 0 до плюс 350°C, дающая возможность проводить измерения при номинальной рабочей температуре рабочего конца и изменяющейся температуре свободного конца в процессе эксплуатации с погрешностью для термопары не более $\pm 0,5^\circ\text{C}$ и выполнения требования стандарта [6].
2. Минимизация термоэлектрической неоднородности при формировании рабочего конца (спая) и свободных концов.
3. Уменьшение металлоемкости (для исполнения 5610.000).
4. Возможность многократного монтажа и демонтажа в процессе эксплуатации (в пределах упругой деформации оболочки кабеля и арматуры) для ревизии состояния и проверки с целью определения остаточного ресурса.
5. Комплексная поставка партии термоэлектрических преобразователей (с ЗИП) на один энергоблок (в объеме не более 250 шт.) с индивидуальными градуировочными характеристиками и с нормированным коэффициентом преобразования (отклонение от среднего значения термоэдс при температуре 350°C не более $\pm 63 \cdot 10^{-6}\text{В}$ или не более $\pm 1,5^\circ\text{C}$ в температурном эквиваленте).

Кроме того, при разработке одновременно решался вопрос обеспечения надежного теплового контакта рабочего конца (спая) с металлоконструкцией канала «ТК» (в наконечнике) и в чехле на трубопроводе посредством узла крепления термопреобразователя на БЗТ и узла крепления термопреобразователя на ГЦТ, а также возможность длительного хранения (до 10 лет) термопреобразователей в составе ЗИП (негорючий, влагозащитный контейнер для транспортировки и хранения).

Конструкция термоэлектрического преобразователя.

На рис. 1 и 2 представлены следующие данные термоэлектрического преобразователя: форма, габаритные, установочные и присоединительные размеры. На рис.3, 4 представлены фотографии узлов крепления термоэлектрического преобразователя.

В качестве конструкционного материала оболочки кабеля и арматуры использована аустенитная нержавеющая сталь марки 08X18H10T (12X18H10T для элементов арматуры), удовлетворяющая одновременно требованиям стойкости к воздействию температуры и агрессивным химическим воздействиям борной кислоты, окислов азота, а также к дезактивирующим химическим растворам. Термопара (горячий спай) электрически соединена с металлоконструкцией (лазерной сваркой) с целью устранения электрического заряда (электронов), образующегося в материале термопары под действием ядерного излучения и приводящего к возникновению дополнительной погрешности измерения [7,8].

Проволоки термопары электрически изолированы в кабеле друг относительно друга и оболочки кабеля порошкообразным окислом металла (MgO). Свободные концы термопары переходят на медные многопроволочные проводники, образуя узел выводных концов. Оболочка кабеля со стороны рабочего конца, сформированная в виде обечайки для уменьшения массы (размера) спая термопары и увеличения устойчивости оболочки к продольным силовым нагрузкам, герметично закрывается сварным швом. Со стороны свободных концов внутренняя полость кабеля совместно с термоэлектродами и удлинительными медными проводниками послойно герметизируется двумя различными герметиками, являющимися одновременно изоляторами с высоким объемным и поверхностным электросопротивлением. Внешний герметик, как и изоляция медных проводников, обладает гидрофобностью, что позволяет эксплуатировать термопреобразователь при повышенной влажности, а также непосредственное размещение холодного конца (без пробирок) в тающем льде при проведении калибровки.

Конструкция рабочего конца термоэлектрического преобразователя 5609.000 обеспечивает тепловой контакт спая термопары с теплоносителем через стенку глухого отверстия диаметром 1,5 Н9 в чехле ГЦТ, а также по газовому (воздушному) зазору,

образованному между оболочкой кабеля и глухим отверстием протяженностью 15 мм. Величина воздушного зазора определена квалитетом Н9/е9.

Конструкция рабочего конца термоэлектрического преобразователя 5610.000 обеспечивает тепловой контакт с теплоносителем через стенку наконечника канала «ТК» на БЗТ непосредственно по контакту спая со сферической поверхностью дна цилиндрического глухого отверстия диаметром 4мм. Прижим осуществляется с усилием, передаваемым от арматуры, заземленной в цанге узла крепления. Усилие прижима контролируется при монтаже (до 35Н) и лимитируется максимальным допусаемым напряжением смятия обечайки кабеля в режиме «большая течь» под контайментом (температура - +350°С, наружное давление парогазовой среды - 0,5 МПа). Выше горячего спая теплообмен между арматурой диаметром 3мм и каналом «ТК» осуществляется по газовым зазорам ($2\delta_1=1\text{мм}$, $2\delta_2=5\text{мм}$) с большим термическим сопротивлением.

Наличие газового зазора с большим термическим сопротивлением уменьшает теплообмен от внутреннего источника энерговыделения с распределенными параметрами массивной нижней платы БЗТ по арматуре термоэлектрического преобразователя к горячему спаю по сравнению с ТХА-2076 (γ - разогрев).

При извлечении термоэлектрического преобразователя (из чехла трубопровода и канала «ТК»), предназначенного для дальнейшего использования, необходимо прилагать усилие вытяжки, не превышающее предельно допустимое по условиям упругой деформации, которое при температуре $\leq 100^\circ\text{C}$ составляет:

- по кабелю диаметром 1,5мм $F_1=200\text{Н}$;
- по арматуре диаметром 3,0 мм $F_2=820\text{Н}$.

3. ОПИСАНИЕ ФУНКЦИЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Функция преобразования термоэлектрического преобразователя типа «К» (напряжение на выходе – температура на входе) аппроксимирована полиномом [4] в области положительных температур.

$$E = b_0 + \sum_{i=1}^9 b_i (t_{90})^i + c_0 \exp[c_1 (t_{90} - 126,9686)^2], \mu\text{V} \quad (1)$$

Обратная функция аппроксимирована полиномом [4]

$$t_{90} = \sum_{i=1}^9 d_i E^i, ^\circ\text{C} \quad (2)$$

Значения термоэдс табулированы в таблицу (справочную) с шагом в 1°C . Однако при производстве термоэлектродных материалов достичь соответствия данным справочной таблицы невозможно. В связи с этим на термоэлектродный материал термопары установлены производственные допуски [9].

На рисунке 5 представлены графики допусков и отклонения термоэдс кабельной термопары типа «К» диаметром 1,5мм от справочных данных для разных производителей. Характерна тенденция значительного увеличения термоэдс при стабилизации отжигом, рекомендованным стандартом IEC1515 [5]. В любом случае невозможно подобрать термоэлектродный материал для термоэлектрического преобразователя с нормированной функцией преобразования, удовлетворяющей требованиям точности измерения с погрешностью не более $\pm 1^\circ\text{C}$ для СВРК [6]. Поэтому рекомендуется применять индивидуальные функции преобразования, описываемые различными полиномами в определенных областях температуры. Наиболее оптимальным методом описания формулы для расчета индивидуальной функции преобразования в диапазоне температур от 0 до 350°C при калибровке и измерениях температуры оказался метод интерполирования кубической сплайн-функцией, коэффициенты которой кусочно-

постоянны и которая в узлах интерполяции принимает заданные значения [10] по результатам калибровки.

В таблице 1 представлены данные по сходимости между табулированными значениями термоэдс из справочной таблицы [4] и расчетными данными, полученными методом интерполяции кубической сплайн-функции с заданными значениями температуры и термоэдс в восьми узлах.

На рис.6 представлено семейство расчетных кривых ожидаемой погрешности измерения температуры теплоносителя в первом контуре РУ ВВЭР-1000 преобразователями термоэлектрическими типа «К» в составе СВРК «Гиндукуш» при использовании в расчете нормированных функций преобразования.

Расчет приведен для следующих эксплуатационных условий:

- диапазон изменения температуры свободных концов термопреобразователей в процессе эксплуатации от +20 до +150 °С;
- преобразователи термоэлектрические изготовлены из кабеля термодарного с минералокерамической изоляцией, подвергнутого стабилизационному отжигу;
- отклонение термоэдс от номинальной функции преобразования (формула 1) имеет зависимость, представленную на Рисунке 5 (для группы 1);
- проведена процедура введения поправки (аддитивной постоянной) в программу расчета температуры по методике, применяемой на АЭС (при квазиизотермическом состоянии РУ по 1 контуру на минимально-контролируемом уровне мощности [МКУ]), из-за отклонения термоэдс термопары от номинальной функции преобразования.

4. ТИПОВЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ.

В процессе изготовления и приемки термоэлектрические преобразователи проходят различные виды испытаний в соответствии с программой испытаний.

Основные виды производственных испытаний

К основным видам испытания (важным для метрологии) относятся:

- Контроль сопротивления изоляции термопары при нормальной температуре. Допускаемое сопротивление $\geq 5 \cdot 10^{10}$ Ом. Все термопреобразователи подвергаются данному виду контроля.
- Контроль сопротивления изоляции термопары при номинальной температуре применения (350 °С) на 90% длины. Допускаемое сопротивление изоляции $\geq 5 \cdot 10^7$ Ом. Испытания проводятся на выборке из 5 термоэлектрических преобразователей из партии для подтверждения качества кабеля.
- Контроль сопротивления термоэлектродов и цепи термопары на соответствие нормированным параметрам. Контрольные данные паспортируются для дальнейшего контроля в процессе эксплуатации.
- Калибровка индивидуальная. Калибровочные данные в виде табулированных значений паспортируются.
- Проверка величины термоэдс термопреобразователя термоэлектрического на соответствие расчетной в пределах допуска ($\pm 20 \mu\text{V}$) при реперной температуре затвердевания свинца ($t_{90}=327,46^\circ\text{C}$) для двух значений температуры свободных концов (0°C , $25 \pm 5^\circ\text{C}$). Проверке подвергаются пять термопреобразователей из партии. Типовой протокол поверки термоэлектрического преобразователя (с заводским номером 627) представлен на рисунках 7 и 8.
- Проверка на соответствие допускаемому отклонению термоэдс ($\pm 63 \mu\text{V}$) от среднего значения при температуре 350°C каждого термопреобразователя из партии.

5. ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В таблице 4 представлены данные по размещению термоэлектрического преобразователя исполнения 5609.000 и 5610.000 на АЭС с ВВЭР-1000 в составе СВРК «Гиндукуш».

В феврале 1996 года проводилось обследование термоэлектрических преобразователей, выработавших назначенный ресурс, на третьем блоке Балаковской АЭС. Обследование проводилось с целью определения возможности продления срока службы.

Контролировалось:

- состояние (визуально) изоляции удлинительных проводов и наружного слоя герметика;
- усилие извлечения термопреобразователей из каналов «ТК» (целиком пучок из 7 штук);
- герметичность сварного шва термопары и последствия контакта с дном канала «ТК» под нагрузкой;
- изменение электрического сопротивления цепи термопары;
- наличие следов коррозии на сварных швах и на материале арматуры (визуально);
- наличие межкристаллической коррозии стали 12Х18Н10Т (разрушающий метод контроля на одном термопреобразователе);
- изменение термоэдс по отношению к термопреобразователям из состава ЗИП при температуре 250 и 350°С;
- величина радиоактивности рабочего конца термоэлектрического преобразователя.

Все контрольные термоэлектрические преобразователи прошли испытания на соответствие параметрам, оговоренным в программе испытаний.

Отмечено следующее:

- усилие извлечения пучка термопреобразователей (7 штук) составляло в момент срагивания не более 400Н и не более 200Н при дальнейшем подъеме (в пределах упругой деформации);
- поверхность сварного шва в месте контакта с дном канала не имела следов окислов, а на поверхности арматуры (диаметр 3 мм) в месте контакта края отверстия наконечника канала «ТК» (диаметр 4 мм) образовался поясok глубиной не более 0,010 мм, что приводит к заключению о прецессии арматуры термопреобразователя внутри трубы канала «ТК» в процессе эксплуатации;
- сопротивление цепи каждой термопары (5610.000) изменилось в сторону увеличения, но не превысило 3 Ом при сопротивлении цепи 140-155 Ом;
- произошло увеличение термоэдс по отношению к контрольным термопарам из состава ЗИП (в первый год эксплуатации) и составило (максимально) 0,73°С при температуре 250°С и 0,90°С при температуре 350°С;
- мощность дозы γ -излучения не превышала 20 мБЭР/ч на расстоянии 10 см от нижней части арматуры.

По результатам обследования специалистами АЭС и РНЦ «Курчатовский институт» было принято решение о продлении срока эксплуатации на три года.

Дальнейшие работы по совершенствованию термоэлектрического преобразователя в основном были направлены на уменьшение дрейфа термоэдс в процессе эксплуатации и отработку методики калибровки и автоматизацию процесса калибровки (включая калибровку извлеченного из реактора термопреобразователя).

Это позволило в 2000 году, используя термоэлектрические преобразователи и экспериментальный комплекс контроля температуры (на базе стандартных блоков аппаратуры «Гиндукуш-М» и персонального компьютера), провести эксперименты на первом блоке Калининской АЭС по отработке новой конструкции головки кассеты ТВСА

в целях улучшения представительности контроля среднесмешанной температуры на выходе ТВС.

В таблице 2 представлены данные по отклонению от средней температуры теплоносителя по 14 независимым каналам в изотермическом режиме на начало и конец топливной кампании (в реальном времени с периодичностью цикла измерений 1 раз за 4 с).

В таблице 3 представлены данные измерения температуры на первом блоке (пусковом) Ростовской АЭС в изотермическом режиме по первому контуру.

Регистрация сигналов проводилась по штатной аппаратуре «Гиндукуш» с последующим расчетом температуры методом интерполяции сплайн-функцией.

Из результатов измерения следует, что в камере смешения в момент измерения нет изотермичности, так как отклонение от среднего значения температуры составило 3σ .

ВЫВОДЫ

1. Термоэлектрический преобразователь специального назначения со стабилизированной характеристикой и с индивидуальной калибровкой может быть использован в составе СВРК «Гиндукуш».
2. В составе СВРК «Гиндукуш – М» термоэлектрический преобразователь специального назначения становится конкурентоспособным по точности измерения с платиновым термометром класса А (в случае использования для измерения температуры свободных концов платинового термометра сопротивления с индивидуальной градуировкой).
3. При работе на АЭС с термоэлектрическим преобразователем 5610.000 уменьшается дозовая нагрузка на персонал за счет сокращения времени на монтаж и демонтаж, а также экспозиционной мощности γ -излучения от наведенной радиоактивности конструкционного материала за счет уменьшения массы.

Ссылочные материалы

1. Преобразователь термоэлектрический специального назначения. Техническое задание на разработку, изготовления и разовую поставку (ИАЭ им. И.В. Курчатова инв. № 32.24573 от 02.12.91 г.).
2. Преобразователи термоэлектрические ТХА/ТХК-2076. Технические условия ТУ 25-0470.0138-85. НПО Термометрия, г. Львов.
3. У.Е. Браунинг, К.Е. Миллер. Вычисленные изменения состава термопар под действием излучения (Измерения температур в объектах новой техники Сборник статей под редакцией А.М. Гордова, Мир, Москва 1965г.).
4. INTERNATIONAL STANDARD IEC 584-1 (Справочные таблицы).
5. INTERNATIONAL STANDARD IEC 1515 (Термопары и кабели термопар с минеральной изоляцией).
6. ГОСТ 26635 Реакторы ядерные энергетические корпусные с водой под давлением. Общие требования к системе внутриреакторного контроля.
7. Маркина Н.В. и другие «Радиационные эффекты термоэда в металлах и сплавах». Сборник докладов Всесоюзной школы по внутриреакторным методам исследований. Дмитроград, НИИАР им. В.И. Ленина, 1978г.
8. Конин Д.И., Мильто В.А., Митин В.И., Семченков Ю.М. «Исследование влияния реакторного излучения на показания термопар типов хромель-алюмель и хромель-копель». Отчет ИАЭ инв.№ 32/307.1978г.
9. INTERNATIONAL STANDARD IEC 584-2 (Допуски).
10. «Программа расчета индивидуальной статистической (градуировочной) характеристики преобразования (ИСХ) и температуры по ИСХ преобразователя термоэлектрического специального назначения». Российский научный центр «Курчатовский институт», инв. № 32/1-40-199 от 09.02.1999г.