

УДК 621.039.517.5

Троепольская А.А.

студент

Научный руководитель: Волкодаева М.В., к.т.н, профессор

Санкт-Петербургский горный университет

**МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ
ИСПЫТАНИЯХ ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

Изучена система и методы измерения температуры при испытаниях ядерно-энергетических установок. Произведен анализ контроля работоспособности измерительных приборов и текущего состояния системы измерения температуры, предложен вариант ее усовершенствования на основе технического и экспериментального исследований.

Ключевые слова: ядерно-энергетическая установка, измерение температуры, термомпара, точность измерений, действительные метрологические характеристики.

Троепольская А.А.

student

Scientific adviser: Dr. Volkodaeva M.V., associate professor

St. Petersburg Mining University

**MODERNIZATION OF THE TEMPERATURE MEASUREMENT
SYSTEM DURING NUCLEAR POWER UNITS TESTING**

The temperature measurement system and methods was studied at the enterprise during nuclear power units testing. The analysis of the current state of temperature measurements system was carried out and an improvement option based on technical and experimental research with a corresponding feasibility study is proposed.

Key words: nuclear power unit, temperature measurements, thermocouple, measurement accuracy, valid metrological characteristics.

Ядерная энергетическая установка — совокупность оборудования, включающая в себя ядерный реактор, технические средства, обеспечивающие его работу, устройства вывода из реактора тепловой энергии с последующим преобразованием ее в тепловой электрический или механический вид энергии. Энергетический реактор оснащен большим количеством контрольно-измерительной аппаратуры, предназначенной для оптимизации режима и управления работой.

Однако, прежде чем запустить ядерную установку в серийное производство, необходимы тщательные их испытания, позволяющие выявить конструкторские и эксплуатационные дефекты.

Исправная установка зависит от множества факторов, однако, температура — один из важнейших параметров, во многом определяющих эффективность разработки, испытаний и эксплуатации ядерных установок различного назначения. Занижение температуры приводит к падению мощности реактора. В то время как увеличение влечет за собой несанкционированный разгон реакторной установки, что впоследствии может привести к авариям, влекущими за собой большой экономический и экологический ущерб. По этой причине получение точных результатов при измерении температуры в ядерно-энергетических установках является крайне актуальной задачей.

Кроме того, замеры показания температуры производятся на постоянной основе и при влиянии различных внешних факторов, таких как вибрация, радиационное воздействие и другие экстремальные условия, что может привести к погрешностям результатов измерений. Их сокращение путем модернизации системы измерения температуры ядерно-энергетических установок, может дать больший эффект, чем совершенствование измерительных приборов, что еще более важно, если учесть, что за последние годы не было создано ни одного принципиально

нового измерительного прибора, чем термоэлектрические термометры, которые существуют уже много лет.

Измерения температуры в основном относятся к внутриреакторным, поэтому обусловлены наличием целого ряда достаточно жестких факторов.

Основными и наиболее специфичным факторами является излучение и радиационный нагрев, поскольку они способны непосредственно воздействовать на чувствительный элемент измерительного прибора, вследствие чего привести к значительным погрешностям измерений.

В ядерных установках в основном применяются непрерывные во времени контактные методы измерения температуры, заключающиеся в прямом контакте измерительного датчика и исследуемого объекта, чтобы достичь состояния теплового равновесия между ними.

Специфические условия работы в активной зоне затрудняют или делают невозможным использование при внутриреакторных температурных измерениях приборов общепромышленного назначения. Наиболее приемлемыми для этой цели являются термоэлектрические термометры, термопары хромель-копель (ТХК), являющиеся наиболее устойчивыми среди термопар другого типа в условиях реакторного облучения и позволяющие проводить длительные измерения до 800 °С. Термоэлектрические термометры или термопары основаны на возникновении электродвижущей силы в цепи, составленной из разнородных проводников при различии температур в местах их соединений.

Источниками погрешностей измерений термопар могут служить изменения градуировочной характеристики под воздействием излучения, неоднородность материалов электродов (исходная или приобретенная из-за старения или из-за механических деформаций).

Для обеспечения безопасности и экономической эффективности эксплуатации энергетических установок с водо-водяными реакторами типа

ВВЭР необходимо измерение температуры теплоносителя на входе в реактор и выходе из него. В ядерно-энергетических информация о распределении температуры теплоносителя в активной зоне и всем первом контуре измеряется 4-мя термоэлектрическими преобразователями, размещенными над тепловыделяющими элементами, кроме того имеются две резервные термопары, предназначенные для эксплуатации в случае выхода из строя основных. Также, имеются четыре основные и одна резервная термопары, расположенные в верхней части корпуса реактора, представляющим собой первый циркуляционный контур ядерной установки.

Реактор ВВЭР-3М с технологическими каналами системы измерения температуры представлен на рисунке 1.

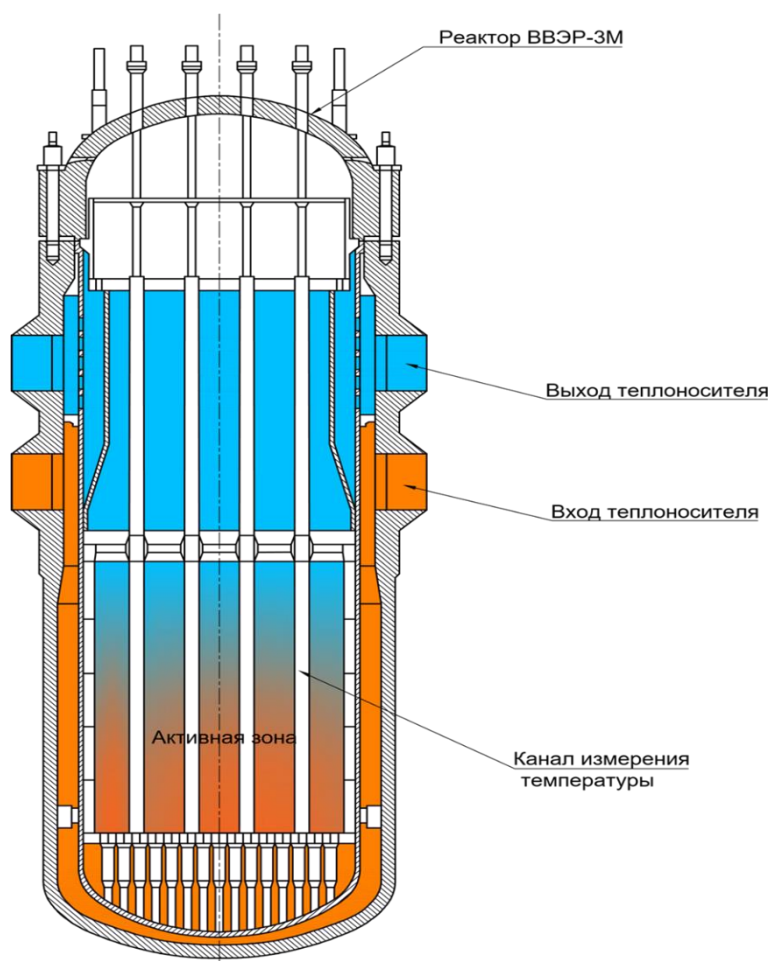


Рисунок 1 – Реактор ВВЭР-3М с технологическими каналами системы измерения температуры

Обеспечение точности результатов измерений температуры включает в себя контроль работоспособности всех приборов и датчиков, подтверждение их действительных метрологических характеристик, а также ремонт или замену вышедшей из строя измерительной аппаратуры.

Погрешность измерения температуры теплоносителя при испытаниях ядерно-энергетических установок нормирована и не должна превышать 1 °С для термопар с индивидуальной градуировкой.

Система терморегулирования ядерной установки обладает следующими особенностями. Штатные датчики температуры с минимальным зазором устанавливаются в специальные технологические каналы. В случае радиационного нагрева рабочего спая выдают более завышенные показания относительно температуры теплоносителя. При длительной эксплуатации из-за постоянного воздействия вибрации термопреобразователи охрупчиваются, что в результате может привести к их обрыву и, как следствие, выходу из строя.

Еще одной проблемой является нестабильность средств измерений в результате возникновения фоновых токов в измерительных цепях, повреждения и накопления дефектов структуры сплавов соединений и проводов, происходящих под воздействием облучения.

Вместе с тем, важность максимальной точности результатов измерения температуры при испытаниях ядерных установок подчеркивается тем, что от них зависит система аварийной защиты испытательной установки, следовательно, завышение максимально допустимой температуры теплоносителя приводит к падению мощности реактора, а понижение может повлечь за собой несанкционированный разгон установки, что может стать причиной аварийной ситуации. Тем более что, трудности, связанные с внезапной остановкой работы реакторной установки, включающей в себя остановку реакции деления с помощью специальных стержней из нейтронопоглощающих материалов, процедуру

расхолаживания активной зоны и всего первого контура установки в целом, влекут за собой огромные экономические издержки, а также угрозу безопасности обслуживающему персоналу.

Помимо этого, некоторые испытания могут длиться не один год. Не говоря уже о реальных условиях эксплуатации, где ядерно-энергетические установки, и вся контрольно-измерительная аппаратура работают непрерывно в течении всего времени топливной кампании, что несомненно выявляет многие, присущие измерительной аппаратуре, в том числе термоэлектрическим преобразователям недостатки: дефекты внутреннего монтажа, нестабильность результатов измерений, вызванная радиационным нагревом чувствительного элемента, возникновением фоновых токов в измерительных цепях, а также понижение точности результатов измерений, вызванная повреждением и накоплением дефектов структуры сплавов соединений и проводов, происходящих под воздействием облучения и т.п.

Соответственно, текущая система измерений температуры при испытаниях ядерно-энергетических установок нуждается в модернизации, заключающейся в применении доступных всевозможных способов повышения точности результатов измерений термоэлектрических преобразователей, позволяющих получить более достоверные результаты при меньших финансовых затратах, а также продлить срок службы системы измерения температуры.

В качестве модернизации системы измерения температуры при испытаниях ЯЭУ предлагается установить по два резервных термопреобразователя в каждый измерительный канал температурной системы. Установка резервных термопар выполняется на начальной стадии перед началом проведения испытаний, а их использование может увеличивать время эксплуатации системы теплообмена, что особенно важно при длительных испытаниях энергетических установок.

В соответствии с конструкционными особенностями судовых установок количество термоэлектрических преобразователей для измерения температуры теплоносителя в реакторе нельзя назвать избыточным. Эксплуатация блока допускается при выходе из строя до 25 % всех преобразователей, поэтому в случае выхода из строя, обрыва более двух температурных датчиков, срабатывает защита реакторной установки, реактор глушится – мощность падает до минимально контролируемой, что влечет за собой огромные экономические затраты. Вместе с тем, если система измерения температуры не работает в полном объеме более 10-30 минут, мощность реактора также должна уменьшаться, а работа самой установки полностью останавливаться, что тоже в свою очередь чревато большими экономическими затратами. Поэтому использование резервных термопар является необходимым условием обеспечения отказоустойчивости системы контроля температуры. Если одна или несколько основных термопар отказывают, то это может привести к серьезным последствиям для безопасности всей системы. Использование резервных термопар обеспечивает быстрое обнаружение отклонения значений от допустимой нормы и сохранение контроля температуры, даже при единичных отказах в системе. К примеру, если штатная термопара выходит из строя, резервные датчики берут на себя ее функции, предотвращая окончательный отказ системы и продолжая измерения температуры.

Данное решение позволит обеспечить, в первую очередь, более точный контроль температуры, так как в случае необходимости у оператора будет возможность сверять показания штатного и резервных термопреобразователей.

Более того резервирование датчиков температуры рационально на случай внештатных ситуаций, таких как, обрыв термопары или ее выход из строя, потеря контроля температуры в реакторе. Таким образом,

использование резервных термопар повышает гибкость работы реактора и обеспечивает сокращение времени его простоя в случае выхода из строя первичных термопар, а также обеспечивает возможность проводить диагностику и ремонт системы контроля температуры без остановки работы реактора.

Еще одним преимуществом резервных термопар является возможность ссылаться на конкретную точку внутри реактора. Это обеспечивает более точные измерения в определенных областях реактора, где изменения температуры могут иметь наибольший эффект на работу реактора. Термопары в реакторах работают непрерывно, вследствие чего, изнашиваются и могут давать завышенные показания. Осуществление тройного контроля в каждой измерительной точке позволяет выявлять расхождение в показаниях штатной и резервной термопар и, следовательно, вести более объективный контроль за измерениями температуры и работой самого реактора. На резервные термопары также наводится защита от несанкционированного превышения допустимой температуры, что обеспечивает более эффективный и безопасный процесс эксплуатации реактора.

Данный метод позволяет повысить точность результатов измерений термоэлектрических преобразователей, предотвратить возможные отказы системы измерения, а также проводить усиленный контроль температуры теплоносителя в конкретных измерительных точках установки, где ее изменения могут иметь наибольший эффект на работу реактора, что существенно снижает финансовые затраты и повышает достоверность результатов измерений, облегчая принятие решения о допустимых сроках эксплуатации и о необходимости замены термопреобразователей.

Резервные термопары производят измерение той же температуры. Результаты измерений термопар затем сравниваются. Если результаты отличаются, то это может указывать на более высокую погрешность

основной термопары. В этом случае можно использовать значения полученных измерений для корректировки измерений основной термопары. Также с помощью резервных термопар штатные температурные датчики проверяются на наличие электрических проблем, таких как нестабильность и индуктивность.

В качестве резервных средств измерения температуры выступают преобразователи термоэлектрические (ПТ) типа ТХА-1072 ОК, имеющие 1 класс допуска с пределом доп. отклонений термоэлектродвижущей силы (ТЭДС) от номинальной статистической характеристики (НСХ) (по сути допускаемой погрешностью) $\pm 1,5$ °С в диапазоне температур - 40 до 360 °С в соответствии с ГОСТ Р 8.585-2001, которые по своим присоединительным размерам аналогичны существующим штатным ТХК (L), 2 класса допуска с пределом доп. ТЭДС от НСХ $\pm 2,5$ °С, позволяющие оперативно контролировать метрологические характеристики штатных термопреобразователей без их демонтажа с объекта.

Известен способ оценки достоверности показаний, заключающийся в регулярной проверке в лабораторных условиях – ГОСТ 8.338-2002. Однако в лабораторных условиях невозможно точно воссоздать глубину погружения термопары и температурный профиль вдоль нее, поэтому описанный выше способ не дает достоверной информации о погрешности измерения температуры в реальных условиях эксплуатации.

Кроме того, процедура лабораторной проверки, определенная нормативными документами, требует больших трудозатрат и долгосрочного изъятия измерительных приборов из обращения, что влияет на снижение готовности оборудования к использованию, и, соответственно, его эффективность.

В некоторых случаях нецелесообразно в полном объеме поверять измерительные приборы в соответствии с нормативной документацией. Из опыта эксплуатации некоторых измерительных приборов известно, что

значительное число из них используется не во всех диапазонах измерений, и не все их метрологические характеристики необходимы при оценке точности измерений.

Эффект от определения метрологических характеристик измерительных приборов в условиях эксплуатации заключаются в следующем:

- сокращение трудозатрат на поверочные работы и время на изъятие средств измерений из условий эксплуатации;
- исключение признания непригодности измерительных приборов на фактически не используемых диапазонах измерений;
- снижение несоответствия средств измерений из-за неисправности комплектующих элементов, не участвующих в работе средств измерений и не влияющих на метрологические характеристики;
- увеличение межповерочных интервалов.

Метод резервирования включает установку двух дополнительных термопар на исследуемом объекте в каждый технологический канал системы измерения температуры, параллельно штатным термопарам, таким образом, чтобы рабочие торцы резервных термопар гарантировано упирались в дно защитного чехла штатной термопары.

Размещение резервных термопар в канале системы измерения температуры ядерно-энергетической установки представлено на рисунке 2.

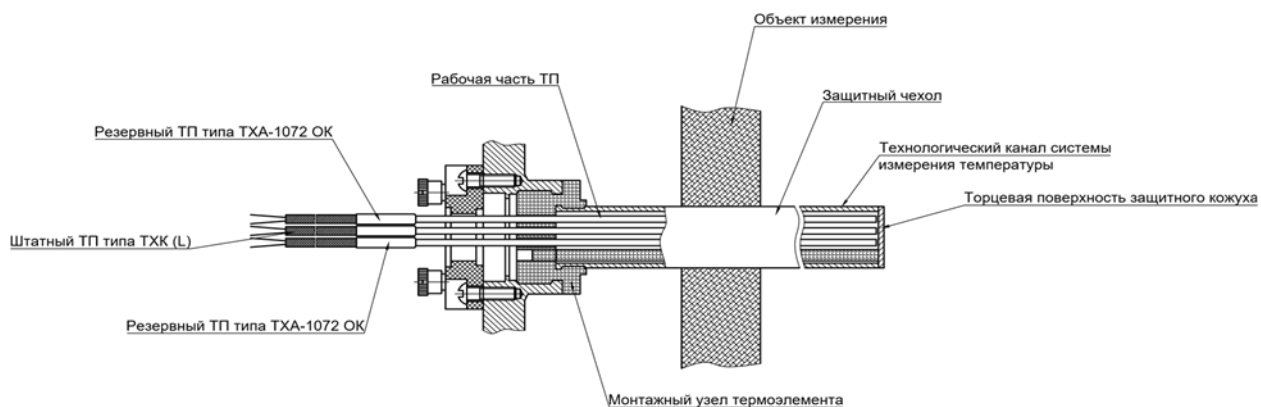


Рисунок 2 – Размещение контрольного термопреобразователя в канале системы измерения температуры ядерно-энергетической установки

Проверка достоверности измерений температуры при использовании резервных термопар производится во время проведения изотермических испытаний на реакторной установке.

До начала проведения работ, в целях обеспечения безопасности персонала, мощность реактора сбрасывается до минимального уровня.

При определении метрологических характеристик термоэлектрических преобразователей ТХК (L) в реальных условиях эксплуатации определяются градуировочные характеристики их чувствительных элементов (ЧЭ). Следовательно, для определения метрологических характеристик термопар во время изотермического испытания определяется электродвижущая сила чувствительных элементов термопар (ТЭДС ЧЭ).

Изотермические испытания начинаются во время разогрева реактора измерением температур $T_{вх}^{изм}$, $T_{вых}^{изм}$, $T_{ср}^{изм}$, $T_{t,kj}^{изм}$ при периодических стабилизациях процесса на разных уровнях температур (таблица 1). Отличия в показаниях основных и резервных приборов не должны превосходить установленного значения. Градуировочные характеристики ЧЭ рабочих ТП должны соответствовать номинальным статистическим характеристикам (НСХ) соответствующего типа в пределах допустимого диапазона отклонений ТЭДС. Величина ТЭДС при указанных температурах рабочих и свободных концов преобразователей не должна отклоняться от значений НСХ более чем на $\pm 0,2 \Delta_{доп}$, где $\Delta_{доп}$ - максимально допустимое отклонение от НСХ.

Таблица 1 – Температурные уровни для проведения изотермических испытаний

Тип ТП (буквенное обозначение НСХ)	Диаметр термоэлектродов, мм	Рабочий диапазон температуры, °С	Температура при измерениях ТЭДС, °С
ТХК (L)	1,4	От - 40 до 360	80, 160, 240, 320

Допускается производить измерение температур и в более узком диапазоне, обусловленным функциональным назначением тестирования изотермического режима реактора.

Каналы измерения температуры проверяются по очереди. С помощью резервных термопреобразователей контролируется температура теплоносителя. При этом температурный ход не должен превышать $0,4^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

Временной интервал между двумя последовательными записями показаний каждого ТП в течение всего цикла непрерывного считывания показаний должен быть одинаковым и не превышать 3 секунд. При этом количество отсчетов показаний резервных и ЧЭ рабочих ТП должно быть не менее 4.

При этом, свободные концы поверяемых ТП, гальванически соединенные с медными нелужеными проводами, термостатируют в термоизолированных сосудах, заполненных водой, равной 20°C . Концы медных проводов подсоединяют к соответствующим клеммам вторичного измерительного устройства, также подключенного к многофункциональному пульту управления установки.

По результатам измерений вычисляется средние арифметические значения температуры: средние арифметические значения ТЭДС каждого из резервных ТП и ЧЭ каждого из штатных ТП. Такие же измерения и обработка проводятся для всех остальных каналов измерения температуры теплоносителя.

Далее, при различных уровнях температуры, указанных в таблице 1, и при различных уровнях мощности получают экспериментальные данные о значении температуры теплоносителя во всех контролируемых точках реактора.

После проведения измерений на всех запланированных режимах, начинается окончательный анализ полученных результатов измерений. По

результатам измерений сопоставляется разница показаний ЧЭ рабочих ТП и показаний резервных ТП.

Затем вычисляется среднее арифметическое значение по формуле 1:

$$\Delta_{\text{ИЗМ}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{\text{ИЗМ}}^i}{n}, \quad (1)$$

где n – число отсчетов в цикле показаний,

$\Delta_{\text{ИЗМ}}^i$ - показания ЧЭ рабочих ТП, °С.

Вычисляется среднее арифметическое значение резервных ТП по формуле 2:

$$t_{\text{ИЭ}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{\text{ИЭ}}^i}{n}, \quad (2)$$

Результат вычисления $t_{\text{ИЭ}}$ заносится в протокол поверки.

Также, чтобы минимизировать влияние погрешности вторичных приборов, проводят отсчеты ТЭДС резервных ТП проводят до 10^{-3} мВ, отсчеты ТЭДС ЧЭ рабочих ТП - до 10^{-2} мВ. Результаты измерений - ТЭДС ЧЭ рабочих ТП вносят в протокол. Операции, перечисленные выше, выполняют при всех заданных значениях температуры.

Средние арифметические значения ТЭДС резервных ТП и ТЭДС ЧЭ каждого из рабочих ТП приводят к значениям ТЭДС ЧЭ ТП $E_{\text{раб.}}^{\text{пр}}$ и $E_{\text{резерв.}}^{\text{пр}}$ при температуре свободных концов, равной 20 °С, внося поправку $E_{(\text{т.к.})}$ на температуру свободных концов ЧЭ. В каждом из случаев поправку определяют по соответствующей НСХ для рабочих и резервных ТП.

Определяется поправка $\Delta_{\text{резерв.}}$, для этого используется приведенная в свидетельстве на поверку функцию отклонения от НСХ по формуле 3:

$$\Delta_{\text{резерв.}} = \frac{E_{\text{резерв.}}^{\text{пр}} - E_{\text{резерв.}}^{\text{свид}}}{(\Delta E / \Delta t)_t}, \quad (3)$$

где $E_{\text{резерв.}}^{\text{пр}}$ - приведенное значение ТЭДС резервного ТП, мВ;

$E_{резерв.}^{свид}$ - значение ТЭДС ТП, взятое из свидетельства на резервный ТП, ближайшее к $E_{резерв.}^{пр}$, мВ, таблица 2;

Таблица 2 – Значение ТЭДС ТП типа ТХА-1072 ОК, взятое из свидетельства

Тип ТП	$E_{резерв.}^{свид}$, мВ, при значениях температуры $t_{свид.}$, °С			
	80	160	240	320
ТХА-1072 ОК	0,615	1,135	2,024	2,610

$(\Delta E / \Delta t)_t$ - чувствительность резервного ТП типа ТХК-1072 ОК на единицу температуры, мВ/°С, указанная в таблице 3.

Таблица 3 – Чувствительность эталонного ТП типа ТХА-1072 ОК

Тип ТП	$(\Delta E / \Delta t)_t \cdot 10^{-3}$, мВ/°С, при значениях температуры $t_{свид.}$, °С			
	80	160	240	320
ТХА-1072 ОК	2,4	3,8	4,7	5,4

Пример определения $\Delta_{резерв.}$ °С, рабочих концов ЧЭ резервных ТП, определенных по приведенным значениям ТЭДС ТП по формуле 3:

$$\Delta_{резерв.} = \frac{0,616 - 0,615}{2,4 \cdot 10^{-3}} = 0,1 \text{ °С, при } t_{свид.} = 80 \text{ °С}$$

$$\Delta_{резерв.} = \frac{1,136 - 1,135}{3,8 \cdot 10^{-3}} = 0,2 \text{ °С, при } t_{свид.} = 160 \text{ °С}$$

$$\Delta_{резерв.} = \frac{2,026 - 2,024}{4,7 \cdot 10^{-3}} = 0,2 \text{ °С, при } t_{свид.} = 240 \text{ °С}$$

$$\Delta_{резерв.} = \frac{2,613 - 2,610}{5,4 \cdot 10^{-3}} = 0,15 \text{ °С, при } t_{свид.} = 320 \text{ °С}$$

С известным значением поправки $\Delta_{резерв.}$ определяется температура t рабочих концов ЧЭ ТП типа ТХК (L), учитывая значение поправки $E(tc.k.)$.

Таким же образом по приведенному значению ТЭДС рабочих ТП определяют температуру t , °С, рабочих концов ЧЭ рабочих ТП, учитывая значение поправки $E(tc.k.)$ по формуле (4):

$$t = t_{свид.} + \frac{E_{раб.}^{пр} - E_{раб.}^{свид.}}{(\Delta E / \Delta t)_t}, \quad (4)$$

где $t_{свид.}$ - значение температуры, соответствующее значению $E_{раб.}^{свид.}$, °С;

$E_{раб.}^{пр}$ - приведенное значение ТЭДС рабочего ТП, мВ;

$E_{\text{раб.}}^{\text{свид}}$ - значение ТЭДС ТП, взятое из свидетельства на рабочий ТП, ближайшее к $E_{\text{раб.}}^{\text{пр}}$, мВ, таблица 4;

Таблица 4 – Значение ТЭДС ТП типа ТХК (L), взятое из свидетельства

Тип ТП	$E_{\text{эт}}^{\text{свид}}$, мВ, при значениях температуры $t_{\text{свид}}$, °С			
	80	160	240	320
ТХК (L)	5,41	11,49	16,8	24,21

$(\Delta E / \Delta t)_t$ - чувствительность рабочего ТП типа ТХК (L) на единицу температуры, мВ/°С, указанная в таблице 5.

Таблица 5 – Чувствительность рабочего ТП типа ТХК (L)

Тип ТП	$(\Delta E / \Delta t)_t \cdot 10^{-3}$, мВ/°С, при значениях температуры $t_{\text{свид}}$, °С			
	80	160	240	320
ТХК (L)	2,9	4,0	4,9	5,8

Пример определения температуры t , °С, рабочих концов ЧЭ поверяемых ТП, определенных по приведенным значениям ТЭДС эталонных ТП по формуле 4:

$$t = 80 + \frac{5,49 - 5,41}{2,9 \cdot 10^{-3}} = 80,4 \text{ °С, где } t_{\text{свид.}} = 80 \text{ °С}$$

$$t = 160 + \frac{11,54 - 11,49}{4,0 \cdot 10^{-3}} = 160,3 \text{ °С, где } t_{\text{свид.}} = 160 \text{ °С}$$

$$t = 240 + \frac{17,4 - 16,8}{4,9 \cdot 10^{-3}} = 240,6 \text{ °С, где } t_{\text{свид.}} = 240 \text{ °С}$$

$$t = 320 + \frac{24,29 - 24,21}{5,8 \cdot 10^{-3}} = 320,6 \text{ °С, где } t_{\text{свид.}} = 320 \text{ °С}$$

Остальные значения температуры t , °С, рабочих концов ЧЭ поверяемых ТП, определенных по приведенным значениям ТЭДС вычисляются аналогичным способом.

По НСХ для ЧЭ поверяемых ТП типа ТХК находят нормированное значение ТЭДС ЧЭ ТП $E_{\text{нсх}}$, соответствующее температуре t , вычисленной по формуле (5), по показаниям резервных ТП типа ТХА-1072 ОК.

Для ЧЭ каждого рабочего ТП определяют разность Δ между приведенным $E_{\text{раб.}}^{\text{пр}}$ и нормированными значениями $E_{\text{нсх}}$ ТЭДС при каждом значении температуры t , вычисленной по формуле (4).

Разность Δ указанных значений для ТП соответствующего типа не должна превышать предела допускаемого отклонения от НСХ $\Delta_{\text{доп}}$ по ГОСТ Р 8.585-2001, указанного в таблице 6. Пример определения ТЭДС ЧЭ рабочей ТП типа ТХК (L), предназначенной для измерения температуры на входе теплоносителя в реактор (таблица 6).

Таблица 6 – Пример протокола измерений температуры технологического канала на входе теплоносителя

Операция	$E_{\text{нсх}}$, мВ	$\Delta_{\text{доп}}$, °С	$t_{\text{эт}}$, °С		$t_{\text{раб.}}$, °С	ТЭДС ЧЭ, мВ, рабочих ТП номеров
			№2	№3		
Отсчет 1	5,49	0,17	79,8	80,1	80,6	4,11
Отсчет 2	5,46	0,17	80,0	79,9	80,2	4,13
Отсчет 3	5,46	0,17	80,0	79,9	80,2	4,12
Отсчет 4	5,47	0,17	79,9	79,8	80,4	4,12
Среднее	5,46	0,17	79,9	79,9	80,4	4,12
E(тс.к. = 20 °С), мВ						1,37
$E_{\text{раб.}}^{\text{нр}} = \bar{E} + E(\text{тс.к.})$, мВ						5,49
Δ, мВ						0,03
Отсчет 1	11,56	0,17	158,6	159,7	160,4	10,16
Отсчет 2	11,56	0,17	158,8	158,9	160,4	10,17
Отсчет 3	11,54	0,17	158,8	158,9	160,1	10,17
Отсчет 4	11,56	0,17	158,9	158,8	160,4	10,18
Среднее	11,56	0,17	158,8	158,8	160,3	10,17
E(тс.к. = 20°С), мВ						1,37
$E_{\text{раб.}}^{\text{нр}} = \bar{E} + E(\text{тс.к.})$, мВ						11,54
Δ, мВ						-0,02
Отсчет 1	17,42	0,17	240,3	240,2	240,3	16,02
Отсчет 2	17,45	0,17	240,1	240,1	240,6	16,03
Отсчет 3	17,45	0,17	240,1	240,2	240,6	16,04
Отсчет 4	17,43	0,17	240,2	240,2	240,5	16,04
Среднее	17,42	0,17	240,2	240,2	240,6	16,03
E(тс.к. = 20°С), мВ						1,37
$E_{\text{раб.}}^{\text{нр}} = \bar{E} + E(\text{тс.к.})$, мВ						17,4
Δ, мВ						-0,02
Отсчет 1	24,37	0,17	320,3	320,1	320,7	22,94
Отсчет 2	24,33	0,17	320,1	320,3	320,5	22,92
Отсчет 3	24,33	0,17	320,1	320,3	320,5	22,91
Отсчет 4	24,35	0,17	320,2	320,4	320,6	22,91
Среднее	24,34	0,17	320,2	320,3	320,6	22,92
E(тс.к. = 20°С), мВ						1,37
$E_{\text{раб.}}^{\text{нр}} = \bar{E} + E(\text{тс.к.})$, мВ						24,29
Δ, мВ						-0,05

Вычисляется отклонение показаний ЧЭ рабочих ТП от НСХ:

$$\Delta = \Delta_{\text{раб.}} - \Delta_{\text{резерв.}} \quad (5)$$

Проверяется выполнение условия пригодности ТП для дальнейшего применения. Величина ТЭДС при указанных температурах рабочих и свободных концов термопар не должна отклоняться от значений НСХ более чем на $\pm 0,2 \Delta_{\text{доп}}$, где $\Delta_{\text{доп}}$ - максимально допустимое отклонение от НСХ.

Результат без демонтажного определения метрологических характеристик рабочих термопар признается положительным при выполнении также следующего условия: средняя квадратичная погрешность единичных измерений разницы температур, вычисленная по формуле 6, должна быть не более 0,3.

$$S_{\text{изм.}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_{\text{изм.}}^i - \Delta_{\text{изм.}})^2}{n-1}} \quad (6)$$
$$S_{\text{изм.}} = \sqrt{\frac{(0,8-0,5)^2 + (0,3-0,5)^2 + (0,3-0,5)^2 + (0,6-0,5)^2}{4-1}} = 0,24$$

Таким образом, использование метода резервирования термопар для измерения температуры теплоносителя в ядерном реакторе является новым и эффективным методом, который повышает надежность измерений и снижает риски возможных аварийных ситуаций. Использование метода резервирования термопар позволяет повысить точность измерения температуры в ядерном реакторе и увеличить срок службы термопар. Вместе с тем данный метод позволяет контролировать температуру в основных контрольных точках реактора и повысить точность измерения. Это также позволяет обеспечить контроль качества работы, выбор оптимальных материалов конструкции и повышение экономической эффективности эксплуатации ядерных реакторов.

Кроме того, данные о погрешностях штатных термопар в дальнейшем при более длительной эксплуатации могут быть оценены и использованы для получения более точных измерений температуры с использованием

резервных термопар. Соответственно данный метод позволяет значительно повысить точность измерений температуры в энергетических судовых установках, обеспечивать (при условии периодической градуировки рабочих и резервных измерительных преобразователей и введении новой градуировочной характеристики) без демонтажа их с объекта контроля для проведения процедуры поверки, не прекращая эксплуатации установки. Соответственно, можно сделать вывод, о положительном результате внедрения резервных термопреобразователей ТХА-1072 ОК в систему измерений температуры в ЯЭУ.

Использованные источники:

1. Патент РФ № 2020138480, 06.08.2021. Ходунков В.П. Способ поверки термопреобразователя без его демонтажа с измеряемого объекта. 2022. Бюл. № 23.
2. Патент РФ № 99100268/28, 10.12.2021. Левин М.Н. Способ определения погрешности измерения температуры. 2022. Бюл. № 34.
3. Pioro I., Duffy R., Pioro R. Fundamental Issues Critical to the Success of Nuclear Projects // Woodhead. 2022. Vol. 78, no. 2. pp. 24-33.
4. Yujie S., Tengfei Y., Xiang C., Changzhi C. Emergency evacuation time model of nuclear power plant pedestrians // Progress in Nuclear Energy. 2023. Vol. 157, no. 1. pp. 1-4.