УДК 621.039.564.3

О ТЕХНИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЯХ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ПЕРВОМ КОНТУРЕ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И ПУТИ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ НА АЭС С РЕАКТОРАМИ ТИПА ВВЭР.

Калагин А.И., Калинушкин А.Е, Ковель А.И., Конин Д.И, Филатов В.П., Хализов М.В., Цветков А.Г. Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский институт», Москва

Ключевые слова: АЭС, CFD, термоконтроль, ВВЭР-1000.

Введение

Точность, надежность и быстродействие мониторинга условий работы ядерного топлива, является основой обеспечения ядерной и радиационной безопасности реакторной установки.

Эксплуатация реакторов, в том числе на номинальной мощности, требует оперативного контроля основных нейтронно-физических и теплогидравлических параметров активной зоны. Эта задача возложена на систему внутриреакторного контроля (СВРК). СВРК разработана для контроля мощности реактора и восстановления поля энерговыделения в активной зоне. Контроль мощности основан на определении нейтронной и тепловой мощности реактора. Для определения тепловой мощности реактора используются каналы измерения температуры в первом контуре.

Структура каналов измерения температуры СВРК-М

В измерительных каналах современной модернизированной системы внутриреакторного контроля СВРК-М применяются два типа преобразователей с индивидуальной функцией преобразования:

- преобразователь термоэлектрический с термопарой типа «К» (ТП);
- термопреобразователь сопротивления платиновый градуировок 50П, 100П и Pt100 (ТСП).

Для реакторной установки с типовым реактором ВВЭР–1000 используются следующие точки измерения (Рисунок 1):

а) В реакторе:

- ТП для контроля температуры теплоносителя на выходе тепловыделяющей сборки (ТВС). Количество точек измерения - 95 штук;
- ТП для контроля температуры теплоносителя под крышкой реактора. Количество точек измерения, равномерно размещенных по окружности – 3 или 4 штуки в зависимости от типа реактора;

– до 4 ТП и 1 ТСП в составе сборок внутриреакторных датчиков (СВРД) (50 шт. – проект В-428 и до 60 в модифицированных проектах);

б) В главном циркуляционном трубопроводе ГЦТ:

– от 16 до 48 ТП в четырех петлях на входе и на выходе из реактора (В-320);
– От 8 до 48 ТСП в четырех петлях на входе и на выходе из реактора (В-320);.

При измерении температуры теплоносителя датчиком типа ТП с эталонной точкой не равной 0 применяется метод расчёта по индивидуальным градировочным характеристикам с приведением эталонной точки к нулю, путем измерения ее температуры в пассивных термостатах типа УППТ (термоконтроль на выходе ТВС) и УКПТП (термоконтроль в ГЦТ).

Измерение температуры эталонных точек ТП осуществляется платиновыми элементами сопротивления градуировки 50П, 100П и Pt100 в зависимости от проектных решений и комплектации.

Особенностями СВРК «Гиндукуш-М» по сравнению с системами предыдущего поколения являются:

– непосредственное подключение каждого первичного измерительного преобразователя к вторичному аналогово-цифровому преобразователю (АЦП), исключив коммутатор сигналов малой мощности, не более;
– уменьшение предельно-допускаемой погрешности преобразования АЦП с 0,25% до 0,05% (с 1,0 до 0,2 °С в температурном эквиваленте);
– устранение в измерительной цепи паразитной термоэдс величиной до ±0,25 °С (в температурном эквиваленте) за счет исключения из измерительной цепи коммутатора сигналов малой мощности;
– повышение скорости измерения и расчета температуры по всем каналам измерения одновременно с частотой не реже одного цикла в секунду вместо одного цикла в 16 секунд;
– возможность увеличения количества измерительных каналов термоконтроля (например, в случае применения в составе СВРК 64 сборок внутриреакторных датчиков, имеющих в своем составе датчики температуры (до пяти точек измерения), а также в случае увеличения количества датчиков температуры в ГЦТ) без изменения времени цикла измерения;
– применение в ВК ВУ индивидуальных градуировочных характеристик ТП и ТСП для расчета температуры, вместо вводимых поправок (аддитивных постоянных) при использовании номинальных статических характеристик в СВРК «Гиндукуш».

В СВРК-М используются аналогово-цифровые преобразователи разработанные ОАО СНИИП:

– Блок аналого-цифровых преобразователей БПА-42Р1 предназначен для измерения и преобразования постоянных и медленно изменяющихся напряжений низкого уровня в цифровой код. Имеет 8 измерительных каналов и диапазон преобразования входного сигнала от минус 20 до +20 мВ. Приведенные пределы допускаемой основной погрешности измерения составляют ±0,05%. Измерение входных сигналов по восьми каналам производится за время менее 100 мс.

– Блок аналого-цифровых преобразователей БПА-44Р1 предназначен для измерения и преобразования значений электрических сопротивлений в цифровой код. Имеет 4 измерительных канала и верхний предел измерения сопротивлений 250 Ом. Приведенные пределы допускаемой основной погрешности измерения при пределе шкалы 250 Ом составляют ±0,05%. Время измерение входных сигналов по четырем каналам менее 100 мс.

Требования нормативных документов к предельно-допустимым погрешностям измерения температуры теплоносителя в первом контуре

В настоящее время требования к погрешностям измерения температуры теплоносителя в первом контуре реакторов типа ВВЭР изложены в следующих нормативных документах:

– ГОСТ 26635-85 «Реакторы ядерные энергетические корпусные с водой под давлением. Общие требования к системе внутриреакторного контроля» (носит рекомендательный характер), в котором нормированная основная погрешность измерения параметра при доверительной вероятности 0,95 не должна превышать величины ±0,3 ^{0}C для каналов с ТСП и ±1,0 ^{0}C для каналов с ТП;

– РД ЭО 0515-2004 «Нормы точности измерений основных теплотехнических величин для атомных электрических станций с водо-водяными энергетическими реакторами ВВЭР-1000» (выполнение требований на АЭС обязательно), в котором «статическая погрешность результата однократного прямого измерения» (при отсутствии систематической погрешности) не должна превышать величины ±0,5^{0}C для каналов с ТСП и ±1,0 ^{0}C для каналов с ТП.

Преимущества использования преобразователей с индивидуальной статической характеристикой (ИСХ).

На рисунке 2 представлены величины отклонения термоэдс от номинальной статической характеристики (НСХ) кабельных термопар типа «К», применяемых в каналах измерительных СВРК. Из приведенных на рисунке данных

следует, что термоэлектрические преобразователи, используемые на АЭС, после термического отжига (или не прошедшие термический отжиг, но в процессе эксплуатации подвергаемые длительному воздействию температуры) имеют отклонения от НСХ в сторону увеличения термоэдс. Величина отклонения при номинальной рабочей температуре применения ТП (300-320^{0}С) почти вдвое превышает величину допускаемого отклонения для класса допуска 2, что является несоответствием требованиям нормативных документов, предъявляемых к ТП, и не обеспечивает необходимую точность измерения каналов СВРК.

Применение в СВРК-М индивидуальных градуировочных характеристик ТП позволило резко уменьшить погрешность измерения температуры теплоносителя в первом контуре РУ за счет устранения необходимости использования аддитивных постоянных. Так как использование индивидуальных поправок при применении НСХ, не учитывающих изменения температуры эталонной точки ТП в процессе эксплуатации РУ, приводило к возникновению неопределенности самой поправки для диапазона температур эталонной точки ТП в передлах 20–150 ^{0}С.

Используемый метод индивидуальной калибровки с применением интерполяции кубической сплайн-функцией по восьми опорным точкам в диапозоне 0–350^{0}С позволил свести к минимуму неопределенность интерполяции по отношению к стандартной НСХ термопары типа «К» (по МЭК 60584-1):

$$E(t) = a_0 + \sum_{i=1}^{9}(a_i \cdot t^i) + c_0 \exp[c_1(t - 126.9689)^2]$$

Заводские проверки (испытания на выборке, см. рисунок 3) подтверждают, что неопределенность измерения температуры термоэлектрических преобразователей с ИСХ не должна привышать допускаемого предела (±0,5 °С).

На рисунках 4 и 5 представлены характерные кривые термоэдс и расчетное значение по ИСХ для температуры фазового перехода свинца из жидкого состояния в твердое при температуре эталонной точки ТП равной 0 °С и рабочей температуре, определяемой температурой воздуха в пассивном термостате (+ 26,23 °С). При этом расхождение составляет минус 0,01 °С.

Наличие в составе СВРК-М независимых (индивидуальных) каналов термоконтроля с разными типами датчиков (ТП, ТСП) и вычислительного комплекса верхнего уровня (ВК ВУ), содержащего базу данных индивидуальных калибровочных коэффициентов датчиков температуры, позволяет в настоящее время рассматривать вопросы поверки каналов термоконтроля комплексно, не

применяя методик поверки датчиков в лабораторных условиях. Структура СВРК-М позволяет одновременно (практически без временного смещения) в автоматическом режиме по запросу оператора проводить расчет:

- средней величины температуры в пассивных термостатах ТП,
- средней величины температуры теплоносителя в первом контуре по группам ТП (над активной зоной, под крышкой реактора, в петлях ГЦТ) и по ТС в петлях ГЦТ,
- величины сходимости между группами однотипных (14 групп на БЗТ), и разнотипных датчиков (ТП, ТСП).

Такая комплексная проверка каналов при квазиизотермическом состоянии РУ перед выходом на мощность (перед началом кампании) и в конце кампании перед началом ППР позволяет оперативно выявлять наличие отклонений от нормированных точностных характеристик, провести анализ отказов и устранить выявленные дефекты в каналах измерения в период ППР.

В настоящее время имеются следующие данные по группам каналов термоконтроля на РУ ВВЭР-1000, где эксплуатируется СВРК-М:

- среднеквадратическое отклонение (СКО) в ряду равноточных измерений температуры в петлях ГЦТ с ТП не превышает величины ±0,12 °С за период эксплуатации не менее 5 лет;
- СКО каналов термоконтроля в петлях ГЦТ с ТСП не превышает величины ±0,1…0,25°С в зависимости от поставщиков ТСП (Siemens, Курчатовский Институт, НИИ НПО «Луч», НПО «Термоприлад»);
- СКО каналов термоконтроля над активной зоной с ТП не превышает величины ±0,26 °С на момент выработки ресурса ТП (10 лет).

Применение первичных измерительных преобразователей с индивидуальными функциями преобразования на АЭС выявило нарушение изотермичности под крышкой реактора при проведении процедуры проверки каналов термоконтроля (тарировки). Отклонение составляет от –0,4 до –0,6 °С (при температуре теплоносителя около 270 °С) для реакторных установок типа В-320. Отклонение обусловлено влиянием системы охлаждения приводов СУЗ. Для реакторных установок с увеличенным количеством СУЗ (121 СУЗ для РУ В-412, В-428, В-446) величина отклонения возрастает (до -2°С на РУ В–428).

По этой причине введение поправок по методу тарировки для данных точек термоконтроля не рекомендуется.

Направления для дальнейшего повышения точности.

Во время ввода в эксплуатацию серийных блоков с РУ В-320 было выявлено различие измеренной температуры на выходе из ТВС по сравнению с расчётным значением. Анализ причины расхождения выявил, что около 60% теплоносителя, поступающего к точке измерения, несет информацию о величине подогрева теплоносителя в активной зоне. Оставшиеся 40% (в зависимости от загрузки ТВС в а.з. – с ПЭЛами или без) приходятся на «холодный» теплоноситель из НК и ЦТ («ПЭЛ-эффект»). В самых напряженных ТВС величина расхождения между измеренной и расчётной температурой в пределах 10…14°С при среднем подогреве по активной зоне 30 °С.

С целью улучшения контроля подогрева теплоносителя в ТВС в ОКБМ была разработана модернизированная головка ТВСА (рисунок 6) со специальными каналами, обеспечивающими поступление теплоносителя после выхода из пучка твэл непосредственно к термопаре. Для исключения «ПЭЛ эффекта», в модернизированной головке ТВСА установлены три специальных канала, выполненные в виде трубы и сопла на выходе из этой трубы. Сопло на выходе имеет конусное расширение и размещается вблизи от термопары. Таким образом, за счет использования трех специальных каналов обеспечивается непосредственное поступление теплоносителя из выходного участка ТВСА к выходной термопаре.

Опыт эксплуатации СВРК-М на энергоблоках АЭС «Тяньвань» показал значительное расхождение между измеряемой температурой теплоносителя на входе в корпус реактора (в холодных нитках ГЦТ по показаниям ТСП) и температурой теплоносителя на входе в ТВС (по показанием $ТП_3$ в составе КНИТ2Т и КНИТ3Т) при работе РУ на номинальной мощности. Величины отклонения на 1 блоке АЭС «Тяньвань» составили 2,5…10 °С.

Были проведены два независимых расчёта гидравлических условий в центральной трубке вблизи измерительной точки $ТП_3$. По результатам расчёта в программном коде SC-1 было получено значение расхода теплоносителя 0,130 кг/с, по результатам CFD моделирования с помощью высокорейнольдсовых моделей турбулентности было получено значение расхода 0,146 кг/с. Эти данные позволили произвести оценку погрешности вносимой теплогидравлическими условиями работы $ТП_3$ и радиоционным разогревом металлоконструкции.

При помощи критериальных уравнений было получено среднее значение коэффициент теплоотдачи между теплоносителем и наконечником чехла – 30240 $Вт*м^{-2}*К^{-1}$. При известной поглощенной в металлоконструкции СВРД дозе q_m = 850 Гр/с, были оценены возможные перепады на стенке и в металлоконструкции – 0,4 ^{0}С и 1,24 ^{0}С

соответственно. Суммарный перепад в 1,64 ^{0}C не может полностью объяснить столь большое расхождение в показаниях. Поэтому, в качестве источника погрешности нами рекомендуется рассматривать плохое качество монтажа измерительной точки ТП. В качестве решения была предложена сборная конструкция наконечника (рис. 7).

Заключение.

Таким образом на данный момент повышение точности и достоверности термоконтроля в первом контуре на АЭС с РУ ВВЭР достигается следующими методами:

- Заменой в измерительных каналах СВРК первичных измерительных преобразователей с НСХ (ТП, ТСП) на первичные измерительные преобразователи с ИСХ, проверенной на стабильность нормированных показателей точности измерения в течение всего ресурса;
- Использованием в составе СВРК АЦП с уменьшенной до 0,05% предельно-допускаемой погрешностью преобразования.
- Устранением в измерительной цепи паразитных термоэдс в кабельных трассах и гермопроходках.
- Внедрением процедуры проверки измерительных каналов на достоверность измерения в пределах требований без демонтажа первичных измерительных преобразователей.
- Снижением методической погрешности измерения температуры теплоносителя на выходе из ТВС путем модернизации головки ТВС, с целью устранения ПЭЛ-эффекта.
- Снижением методической погрешности измерения температуры теплоносителя на входе в ТВС, за счёт изменении конструкции наконечника СВРД.

Список литературы.

1. РД ЭО 0515-2004 «Нормы точности измерений основных теплотехнических величин для атомных электрических станций с водо-водяными энергетическими реакторами ВВЭР-1000»
2. ГОСТ 26635-85 «Реакторы ядерные энергетические корпусные с водой под давлением. Общие требования к системе внутриреакторного контроля».
3. «Опыт эксплуатации каналов измерения нейтронного потока и температуры (КНИТ) на АЭС Тяньвань», М.Г. Мительман, В.М.Троценко НТП «Инкор», О.В. Титов, С.А.Кушманов ОКБ «Гидропресс», МНТК-2009, Подольск.
4. Системы внутриреакторного контроля АЭС с реакторами ВВЭР, В.А. Брагин, И.В. Батенин, М.Н. Голованов и др.; Под ред. Г.Л. Левина. М.: Энергоатомиздат, 1987, 128 с.: ил.- (Б-ка эксплуатационника АЭС; Вып. 20).

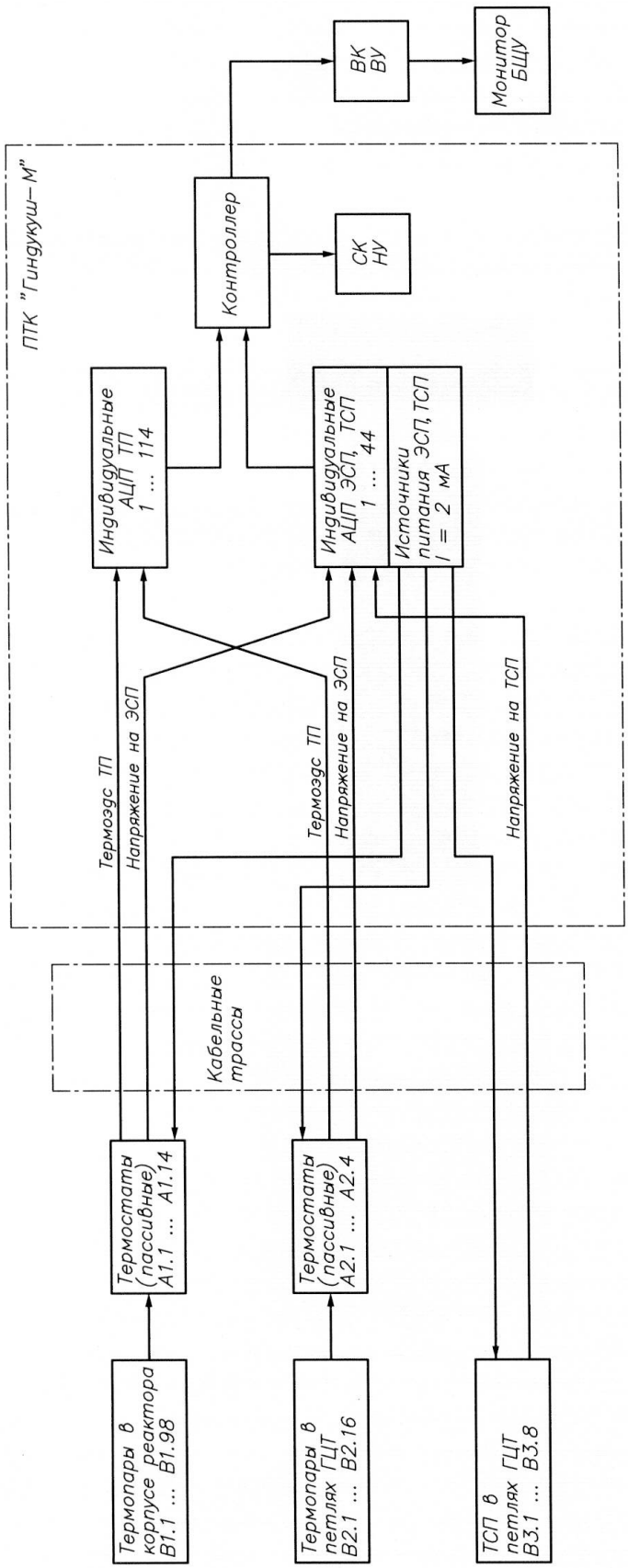


Рисунок 1. Структурная схема каналов измерения температуры теплоносителя на входе в ТВС, под крышкой реактора и в петлях ГЦТ. СВРК "Гиндукуш-М"

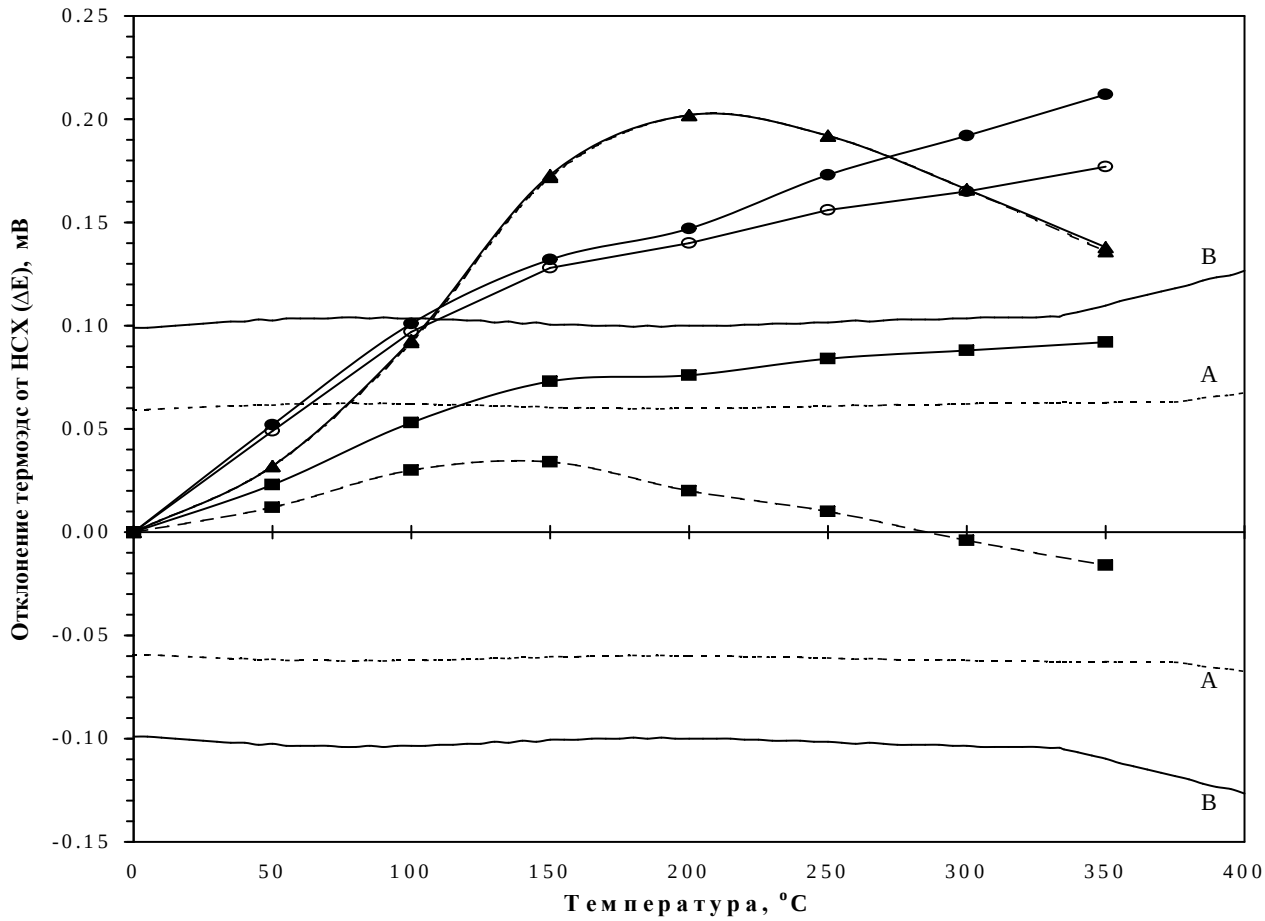


Рисунок 2. Отклонение термоэдс от номинальной статической характеристики термопары хромель-алюмель типа "К" (кабель типа КТМС диаметром 1,5 мм)

Изготовитель кабеля:

● **– Кирскабель, 1988 г. (группа №1),**

○ **– Кирскабель, 2000 г. (группа №2),**

▲ **– Кирскабель совместно с ВНИИНМ (группа №3),**

■ **– фирма ТОМО (Австрия) (группа №4).**

– – – **– до воздействия температуры,**

—— **– после воздействия температуры (+450°С, ~100 часов).**

А – допускаемое отклонение для класса допуска 1 по МЭК 584-2,

В – допускаемое отклонение для класса допуска 2 по МЭК 584-2.

Расчет термоэдс методом интерполяции кубическими сплайн функциями по 8 узловым точкам.

Таблица 1

Температура °С	термоэдс (е), мВ		Отклонение расчетного значения от НСХ по ГОСТ Р 5431-92		
	ГОСТ Р 50431-92	расчет	Δе, мВ	%(е)	ΔТ, °С
0*	0.000*	0.0000	0.0000	0.00	0.0
1	0.039	0.0394	0.0004	0.98	0.010
10	0.397	0.3961	-0.0009	-0.21	-0.023
20	0.798	0.7971	-0.0009	-0.12	-0.023
30	1.203	1.2021	-0.0009	-0.07	-0.022
40	1.611	1.6107	-0.0003	-0.02	-0.007
50*	2.022*	2.0220	0.0000	0.00	0.0
60	2.436	2.4355	-0.0005	-0.02	-0.012
70	2.850	2.8503	0.0003	0.01	0.007
80	3.266	3.2657	-0.0003	-0.01	-0.007
90	3.681	3.6809	-0.0001	0.00	-0.002
100*	4.095*	4.0950	0.0000	0.00	0.0
110	4.508	4.5074	-0.0006	-0.01	-0.015
120	4.919	4.9179	-0.0011	-0.02	-0.027
130	5.327	5.3264	-0.0006	-0.01	-0.015
140	5.733	5.7328	-0.0002	0.00	-0.005
150*	6.137	6.1370	0.0000	0.00	0.0
160	6.539	6.5390	0.0000	0.00	0.0
170	6.939	6.9394	0.0004	0.01	0.010
180	7.338	7.3388	0.0008	0.01	0.021
190	7.737	7.7377	0.0007	0.01	0.018
200*	8.137*	8.1370	0.0000	0.00	0.0
210	8.537	8.5371	0.0001	0.00	0.003
220	8.938	8.9383	0.0003	0.00	0.008
230	9.341	9.3409	-0.0001	0.00	-0.002
240	9.745	9.7450	0.0000	0.00	0.0
250*	10.151*	10.1510	0.0000	0.00	0.0
260	10.560	10.5589	-0.0011	-0.01	-0.027
270	10.969	10.9686	-0.0004	0.00	-0.010
280	11.381	11.3800	-0.0010	-0.01	-0.024
290	11.793	11.7929	-0.0001	0.00	-0.002
300*	12.207*	12.2070	0.0000	0.00	0.0
310	12.623	12.6222	-0.0008	-0.02	-0.019
320	13.039	13.0385	-0.0005	0.00	-0.012
330	13.456	13.4556	-0.0004	0.00	-0.010
340	13.874	13.8734	-0.0006	0.00	-0.014
350*	14.292*	14.2920	0.0000	0.00	0.0

Примечание: 1) * – температура и термоэдс в узловой точке.

2) Δе не превышает 0,001 мВ и удовлетворяет условиям расчета по ГОСТ Р 50431-92 (МЭК 558-1-77)

Рисунок 3. Отклонение от НСХ.

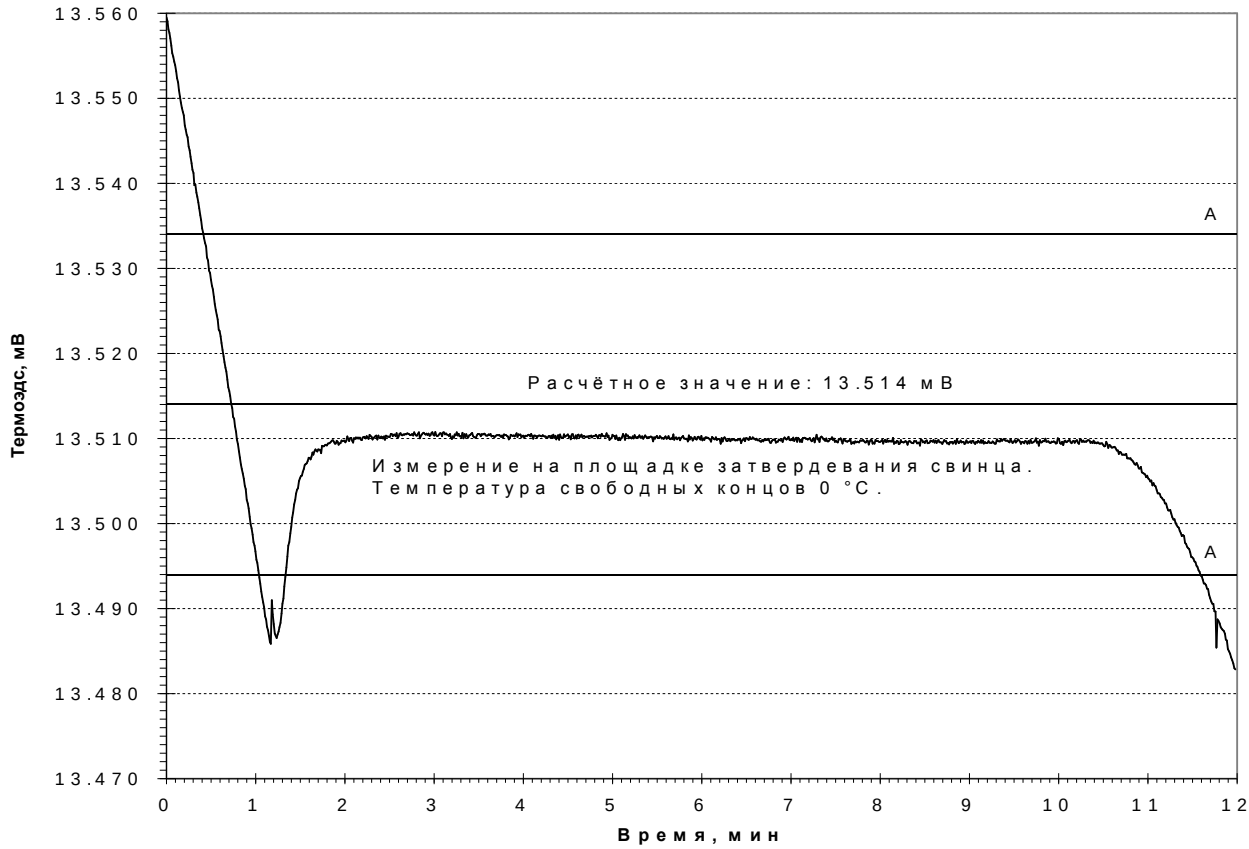


Рисунок 4. Отклонение термоэдс от расчётного значения для ТП при температуре эталонной точки 0 ^{0}C

А – граница допуска на отклонение.

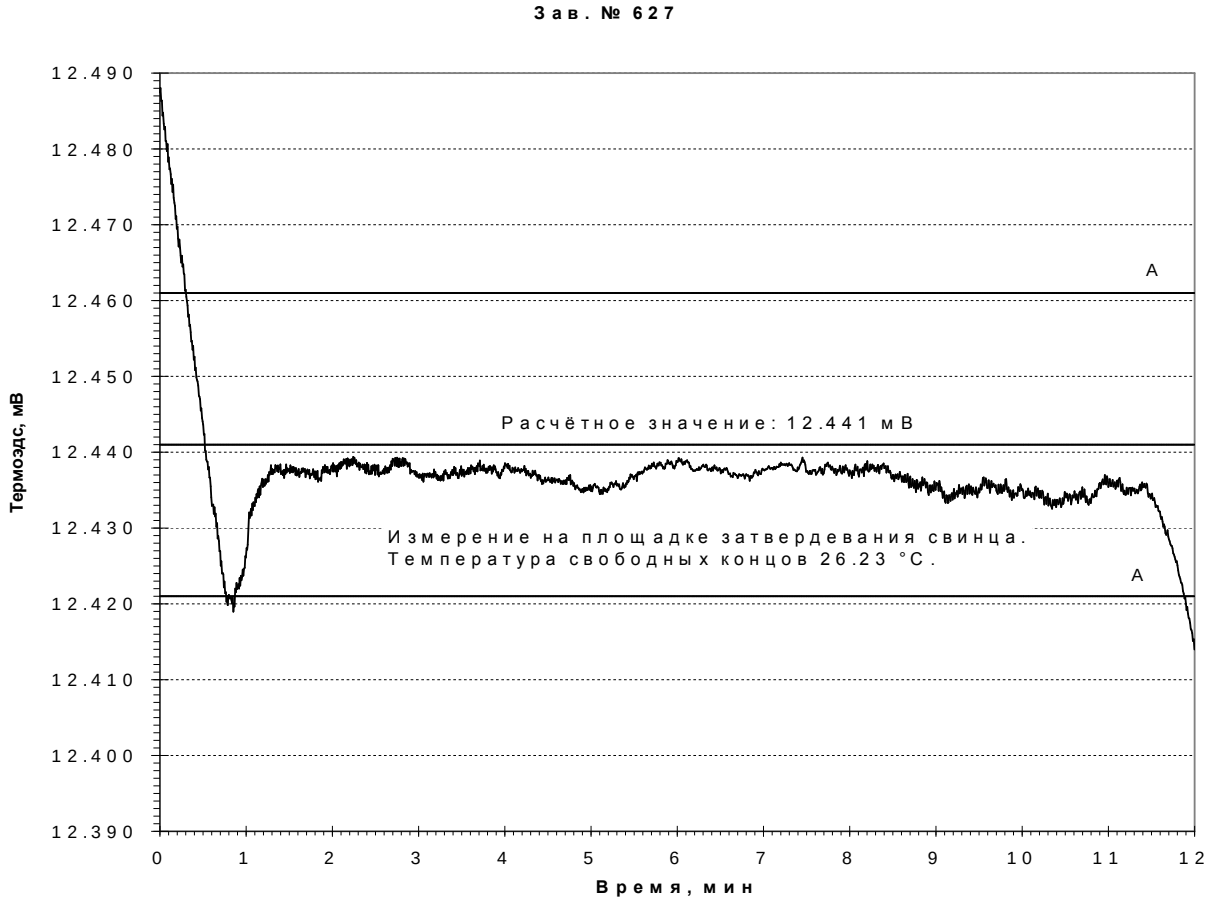
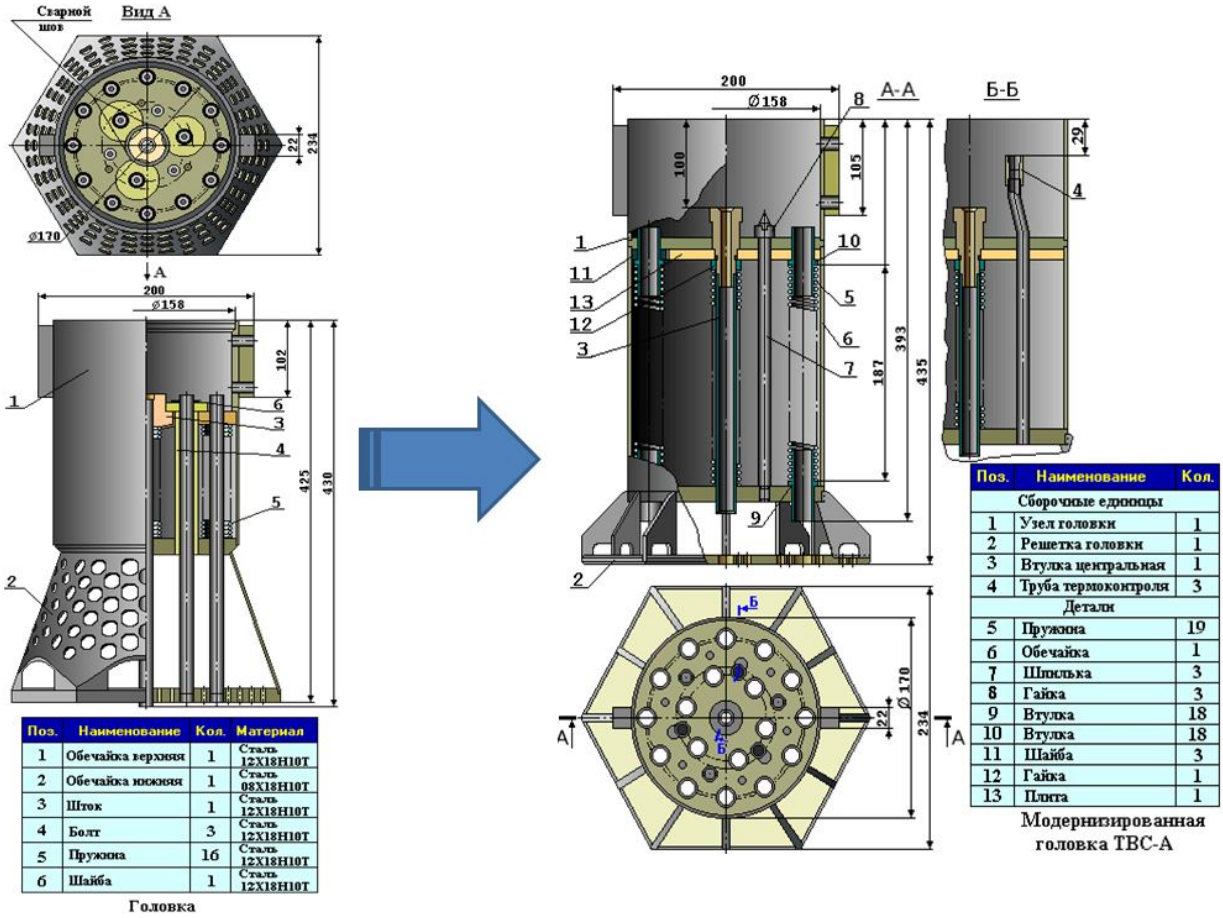


Рисунок 5. Отклонение термоэдс от расчётного значения для ТП при рабочей температуре воздуха в термостате (+ 26,23 ^{0}C)

А – граница допуска на отклонение.



Поз.	Наименование	Кол.	Материал
1	Обечайка верхняя	1	Сталь 12Х18Н10Т
2	Обечайка нижняя	1	Сталь 08Х18Н10Т
3	Шток	1	Сталь 12Х18Н10Т
4	Болт	3	Сталь 12Х18Н10Т
5	Пружина	16	Сталь 12Х18Н10Т
6	Шайба	1	Сталь 12Х18Н10Т

Поз.	Наименование	Кол.
Сборочные единицы		
1	Узел головки	1
2	Решетка головки	1
3	Втулка центральная	1
4	Труба термоконтроля	3
Детали		
5	Пружина	19
6	Обечайка	1
7	Шпилька	3
8	Гайка	3
9	Втулка	18
10	Втулка	18
11	Шайба	3
12	Гайка	1
13	Плита	1

Рисунок 6. Модернизация головки ТВСА.

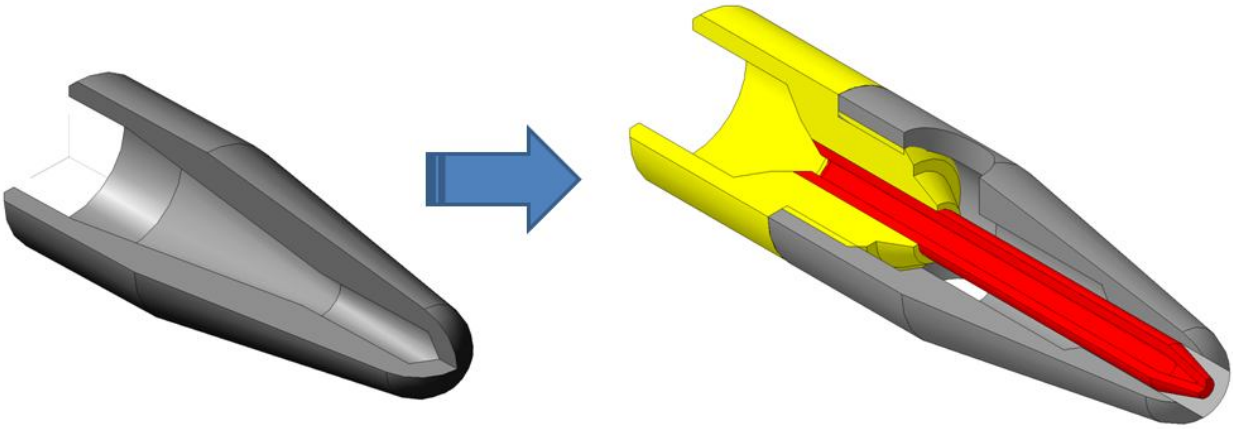


Рисунок 7. Модифицированный наконечник СВРД.