

АТТЕСТОВАННАЯ ПРОГРАММА РАСЧЕТА ГРАДУИРОВОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОМЕТРОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ТЕРМОПАР ДЛЯ ПОВЕРОЧНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ «TERMOLAB»

Т.В. Березняк, Н.П. Моисеева
ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»
ООО «ИЦ «ТЕМПЕРАТУРА»

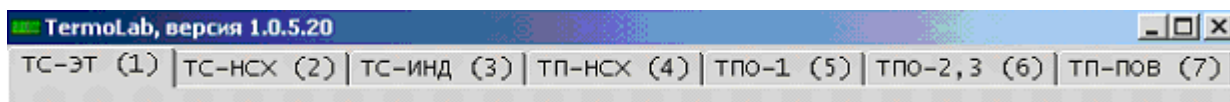
В практике температурных измерений большую роль стали играть компьютерные программы обработки данных. Если раньше самым распространенным способом получения значений температуры, измеренной термопарой или термометром сопротивления, была интерполяция с помощью таблиц НСХ, то сейчас большинство поверителей и потребителей пользуются разнообразными компьютерными программами, реализующими стандартные интерполяционные зависимости и функции отклонения. Программы в большинстве случаев самодельные, иногда встроенные в цифровой прибор. Часто в качестве компьютерных программ используются электронные таблицы, которые хотя и удобны, но, во-первых, могут содержать ошибки в формулах и, во-вторых, не защищены от случайных изменений.

В поверочной службе ошибки расчетов не допустимы. Появилась необходимость в создании универсального, **аттестованного** программного продукта, позволяющего удобно и быстро обработать результаты измерений как при использовании термометров и термопар, так и при их поверке в метрологических лабораториях.

Такая программа была создана и аттестована в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева». Программа называется TermoLab и может иметь несколько модификаций, включающих все или только отдельные компоненты, предназначенные для конкретных задач. Цель данной статьи – представить основные функциональные возможности и преимущества программы, а также объяснить новые алгоритмы расчета индивидуальных градуировочных характеристик термометров и термопар, реализованные в программе.

Основное окно программы содержит несколько вкладок различного назначения, количество которых зависит от комплектации.

Вкладки (в полной комплектации) имеют вид:



ТС-ЭТ (1) – градуировка эталонных термометров сопротивления;
ТС-НСХ (2) – расчет температуры по сопротивлению термометра с использованием НСХ;
ТС-ИНД (3) – индивидуальная градуировка ТС с построением функции Каллендара-Ван Дюзена;
ТП-НСХ (4) - расчет температуры по ТЭДС термопары с использованием НСХ;
ТПО-1 (5) – градуировка эталонных термопар 1 разряда;
ТПО-2,3 (6) – градуировка эталонных термопар 2 и 3 разрядов;
ТП-ПОВ (7) – поверка рабочих термопар.

Остановимся кратко на отдельных задачах и покажем, какие данные необходимо ввести в программу и что мы получим на выходе.

ТС-НСХ (2) и ТП-НСХ (4) – расчет температуры по сопротивлению термометра или по ТЭДС термопары с использованием НСХ.

Эти программы необходимы всем пользователям термометров и термопар. Программы позволяют выполнять любые прямые и обратные расчеты по функциям НСХ, нормированным в ГОСТ 6651-2009 и ГОСТ Р 8.585-2001.

Пример окна ввода данных вкладки ТП-НСХ (термопары)

В окне ввода выбирают тип термопары (любой, по ГОСТ Р 8.585-2001) и вводят измеренное значение ТЭДС, либо температуру, для которой необходимо рассчитать ТЭДС. Можно ввести несколько значений, разделённых пробелом, либо скопировать строку или столбец значений в поля ввода. Для ввода дробных чисел следует использовать точку в качестве разделителя целой и дробной части. Нажав на поле «рассчитать», получаем окно вывода результата. Результат можно сохранять и распечатывать.

ТЭДС, мВ	t, °C
12.00000	294.980
15.00000	366.830
20.00000	484.882
35.00000	842.300

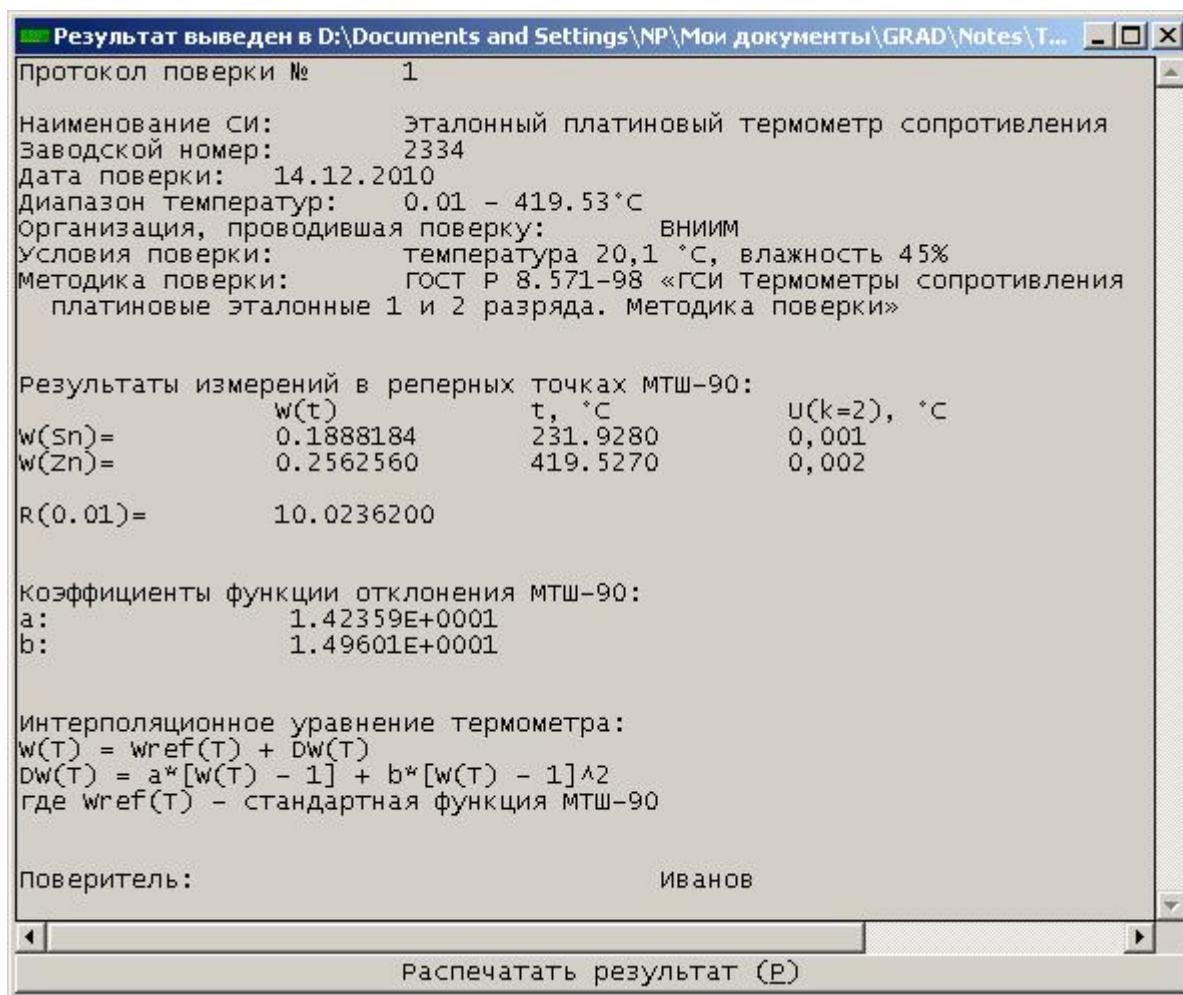
t, °C	ТЭДС, мВ
200.000	8.13847
300.000	12.20857
400.000	16.39714
500.000	20.64429

Аналогично работает вкладка ТС-НСХ для определения температуры по сопротивлению термометра и сопротивления по температуре.

ТС-ЭТ (1) – градуировка эталонных термометров сопротивления.

Программа осуществляет расчет интерполяционной зависимости платинового термометра сопротивления от температуры по методике МТШ-90. Входными данными являются значения сопротивлений в реперных точках. На выходе получаем протокол градуировки. В протоколе используются введенные при запуске программы и сохраненные в конфигурационном файле данные о лаборатории, условиях поверки и измерительных возможностях (неопределенности измерений). Протокол может быть скопирован или распечатан.

Пример протокола поверки:



ТС-ИНД (3) – индивидуальная градуировка ТС с построением функции Каллендара-Ван Дюзена. Функция Калледара - Ван Дюзена (КВД)– это наиболее часто используемая функция для построения индивидуальной градуировочной характеристики рабочих платиновых термометров. Минимальное количество точек градуировки для определения коэффициентов зависимости: две точки выше 0 °C, одна точка ниже 0 °C и одна точка вблизи 0 °C. Часто увеличение количества точек, особенно если градуировка выполняется в широком диапазоне температур, приводит к существенному снижению погрешности интерполяции. Поэтому в программе предусмотрена возможность использования произвольного количества точек градуировки с построением функции КВД с помощью метода наименьших квадратов, причем в расчете учитывается статистический вес каждой градуировочной точки в соответствии с неопределенностью измерений. Так же, как во вкладке ТС-ЭТ, во вкладке ТС-ИНД выводится протокол градуировки, который можно сохранять и распечатывать. Все результаты индивидуальных градуировок ТС-ЭТ и ТС-ИНД записываются в базу данных.

ТПО-1 (5) – градуировка эталонных термопар 1 разряда.

Согласно ГОСТ Р 8.611-2005 индивидуальная градуировочная функция термопар типа ПП первого разряда строится в виде полинома второй степени на основе результатов градуировки в реперных точках цинка, алюминия и меди. Данный алгоритм не учитывает тот очень важный факт, что номинальная функция термопар типа ПП представляет собой в интервале от 0 до 1064,18 °C полином восьмой степени, а не второй. Это приводит к существенным расхождениям полученной по ГОСТ зависимости от экспериментальных

данных, особенно в диапазоне ниже точки цинка. Чтобы исправить положение и, в то же время, не вводить дополнительные точки градуировки, был разработан и аттестован **новый алгоритм расчета индивидуальной функции термопар**. Он основан на построении функции отклонения от стандартной зависимости. Функция имеет следующий вид: это функция класса C1 (т.е. непрерывна она сама и её производная), которая в нуле равна нулю, от нуля до точки золота является полиномом второй степени, после точки золота является линейной.

В общем виде функция имеет вид:

$$\begin{aligned} at + bt^2 & \quad (t < T) \\ ct + d & \quad (t \geq T) \end{aligned}$$

Коэффициенты функции на интервале $[T; +\infty)$ подобраны так, чтобы выполнялись условия:

$$\begin{aligned} (ct + d) |_{(t=T)} &= (at + bt^2) |_{(t=T)} \\ (ct + d)' |_{(t=T)} &= (at + bt^2)' |_{(t=T)} \end{aligned}$$

Что равносильно

$$\begin{aligned} (cT+d) &= (aT+2bT) \\ (c) &= (a+2bT) \end{aligned}$$

$$\text{Отсюда } d = aT + bT^2 - cT = aT + bT^2 - aT - 2bT^2 = -bT^2;$$

Отсюда получаем, что функция имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} at + bt^2 & \quad (t < T) \\ (a+2bT)t - bT^2 & \quad (t \geq T) \end{aligned}$$

Удобно вынести a и b за скобку:

$$\begin{aligned} at + bt^2 & \quad (t < T) \\ at + b*(2Tt - T^2) & \quad (t \geq T) \end{aligned}$$

окончательный вид функции такой:

$$\begin{aligned} & a*t + b* \\ & (\\ & t^2 \quad (t < T) \\ & T*(2t-T) \quad (t \geq T) \\ &) \end{aligned}$$

То есть функция оказалась вида $k1*f1(t) + k2*f2(t)$, для функций такого вида есть готовые алгоритмы для нахождения $k1$ и $k2$ методом МНК, который и реализован в программе.

Коэффициенты данного полинома складываются с коэффициентами стандартной функции (НСХ). Таким образом, индивидуальная функция получается в виде полинома восьмой степени (на промежутке от 20 до 1064 °C), как и номинальная функция. Этот алгоритм реализован во вкладке ТПО-1 для градуировки термопар типа ПП и ПР первого разряда. Благодаря МНК есть возможность увеличения количества градуировочных точек. На

основании результатов аттестации и сравнения нового алгоритма и используемого в настоящее время, новый алгоритм может быть рекомендован для включения в ГОСТ Р 8.611-2005 и МИ 1746-87 при переработке данных стандартов. Очень важно, что работа поверителя при использовании программы существенно упрощается. Нет необходимости рассчитывать функции влияния или выбирать табличные значения коэффициентов из текста стандарта. **Все, что надо сделать для расчета градуировочной характеристики – ввести результаты градуировки термопары в реперных точках в соответствующие поля программы.**

Пример окна ввода:

The screenshot shows the 'TermoLab, версия 1.0.5.20' window. At the top, there are tabs for different calibration types: ТС-ЭТ (1), ТС-НСХ (2), ТС-ИНД (3), ТП-НСХ (4), ТПО-1 (5), ТПО-2,3 (6), and ТП-ПОВ (7). The 'ТПО-2,3 (6)' tab is selected. Below the tabs, there are input fields for:

- Номер протокола (Q): 5
- Заводской номер (w): 319
- Дата (A): 14.02.2011
- Тип термопары (Y): 5 (ТПП)

 A section titled 'Ввести градуировочные значения при t_{хс} = 0°C, мВ:' contains a table of data:

E(Sn, 231.928°C):	
E(Zn, 419.527°C):	3.4440
E(Al, 660.323°C):	5.8591
E(Ag, 961.780°C):	
E(Au, 1064.180°C):	
E(Cu, 1084.620°C):	10.5782

 Below this is a field for 'Измеренная ТЭДС, мВ (неск. через пробел) (Z):' with the value '7.236'. At the bottom, there are four buttons: 'Рассчитать градуировку (F2)', 'База данных (F3)', 'Данные о лаборатории (F4)', and 'О программе (F1)'.

Поле «измеренная ТЭДС» не обязательно для заполнения. В него, при желании, можно вводить любые измеренные данной термопарой, значения ТЭДС за тем, чтобы рассчитать температуру по индивидуальной градуировочной функции. Также можно копировать в него строки или столбцы из электронных таблиц.

После нажатия на «рассчитать градуировку» появляется окно с протоколом поверки. В протоколе приводятся данные о термопаре, о лаборатории, результаты градуировки в реперных точках, все коэффициенты индивидуальной зависимости термопар и таблица ТЭДС с интервалом 100 °С. Результат градуировки автоматически записывается в базу данных.

ТПО-2,3 (6) – градуировка эталонных термопар 2 и 3 разрядов; ТП-ПОВ (7) – поверка рабочих термопар.

Данные программы предназначены для обработки результатов градуировки термопар методом сличения с термопарой более высокого разряда. Реализовано два метода: метод прямых измерений и метод поэлектродного сличения. Входными данными являются результаты измерения ТЭДС эталонной и рабочей термопары, а также температура холодных спаев. Эталонную термопару можно выбрать из базы данных, в которой сохранена ее градуировка. В протоколе выводятся для эталонных термопар 2 или 3 разряда индивидуальные зависимости $E(t)$ и $t(E)$; для рабочих термопар – заключение о годности по соответствующему классу допуска.

Пример окна ввода

TermoLab, версия 1.0.5.20

ТС-ЭТ (1) | ТС-НСХ (2) | ТС-ИНД (3) | ТП-НСХ (4) | ТПО-1 (5) | ТПО-2,3 (6) | ТП-ПОВ (7)

Номер протокола (Q): 10
 Заводской номер (w): 4319
 Дата (A): 14.02.2011

Тип термомпары (U): S (ТПП) Разряд (H): 2 разряд

Метод (B): Прямых измерений

Выбрать эталон (V): ТПО-1 319 14.02.2011

Рез-ты (ЕЭТ (мВ), tск (°C), Епов через пробел) (C):

3.4442	0	3.4445
5.8597	0	5.8590
10.5789	0	10.5795

изм ТЭДС (для t с.к 0°C), мВ (неск. через пробел) (Z):

Рассчитать градуировку (F2) База данных (F3)
 данные о лаборатории (F4) о программе (F1)

После команды «рассчитать градуировку» выводится протокол, содержащий данные о термомпаре, о лаборатории, **все коэффициенты индивидуальной зависимости термомпары и таблица ТЭДС с интервалом 100 °С**. Результат градуировки автоматически записывается в базу данных. Для рабочей термомпары выводится заключение о годности по соответствующему классу.

Работа с базой данных. База данных обо всех проведенных поверках и калибровках – очень важный элемент программного обеспечения термометрической лаборатории. Информация сохраняется в базе данных автоматически после щелчка по кнопке «рассчитать градуировку» во всех вкладках, предназначенных для индивидуальных градуировок. Имя файла, в который сохраняются данные о термомпаре, формируется из названия вкладки, заводского номера и даты поверки. Список всех градуировок открывается по щелчку на кнопке «база данных» основного окна программы. Можно отсортировать термометры по типу, номеру, или дате поверки. Можно удалить любой элемент из базы данных по нажатию кнопки «удалить выделенное».

Защита от несанкционированного доступа. Пользователь, купивший программу, получает индивидуальный ключ активации. С целью защиты программы от взлома предусмотрена процедура проверки контрольной суммы. Контрольная сумма файла с программой изменяется при любой подмене программного кода. Поэтому для того, чтобы убедиться, что программу не взламывали, рекомендуется перед началом работы проверить контрольную сумму программы и сравнить её с суммой, указанной в документации.

Заключение. В настоящее время прямые измерения, без обработки результатов измерений на компьютере, уже почти ушли в прошлое. Аттестация компьютерных программ, используемых в практике поверки и калибровки СИ, является очень важной процедурой, необходимой для подтверждения соответствия полученных при калибровке результатов и аккредитации лаборатории на право поверки. Программа TermoLab позволяет решить многие задачи, встающие перед поверителем СИ температуры.

Все пожелания и предложения по совершенствованию программы и включению новых алгоритмов высылайте в адрес Информационно-образовательного портала «ТЕМПЕРАТУРА» по эл. почте info@temperatures.ru .