

ЛАБОРАТОРНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 53.082.73, 53.082.62

**ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ТЕРМОПАР ПРИ ИЗМЕРЕНИИ
КОЭФФИЦИЕНТА ТЕРМОЭДС МАТЕРИАЛОВ НА ПРИМЕРЕ НИКЕЛЯ**

© 2026 г. Е. Н. Ткачев*, Д. И. Гапич, В. А. Кузнецов, Д. И. Фролов

*Институт неорганической химии им. А.В. Николаева
Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 3
E-mail: etkachev@niic.nsc.ru

Поступила в редакцию 27.04.2026

После доработки 03.06.2026

Принята к публикации 17.06.2026

Представлены результаты измерения коэффициента термоэдс никеля интегральным и дифференциальным методами различными термопарами в широком интервале температур (78–675 К). Выявлены некоторые особенности, которые необходимо учитывать при измерении коэффициента термоэдс материалов дифференциальным методом. Также нами представлены корректные калибровочные данные для термопар нихросил-нисил (тип N).

1. ВВЕДЕНИЕ

Перед экспериментаторами в области измерения коэффициента термоэдс различных материалов периодически встает вопрос калибровки их измерений по эталонному материалу. Паспортизованные эталоны NIST (National Institute of Standards & Technology) представлены двумя материалами: телурид висмута (сертификат SRM3451) и сплав кремний-германий (SRM3452). Помимо достаточно большой стоимости, использование таких эталонов не всегда возможно и накладывает ограничения при определенных методиках измерений. Никель в рамках настоящей работы был выбран потому, что этот металл производится с требуемой чистотой в различных формах (проволока, лента) и имеет более высокие значения коэффициента термоэдс, чем чистые платина или медь. Как ни удивительно, но измерение термоэдс чистого никеля ниже комнатной температуры очень слабо освещено в научной

литературе. Нами найдена единственная работа 1969 года [1], которая посвящена данному вопросу. В основном измерения термоэдс проведены при температурах выше комнатной [2–4]. В настоящей работе мы в качестве “эталоны” измерили температурную зависимость термоэдс никелевой проволоки (НП2, 99.5%, $\varnothing = 0.12$ мм) в диапазоне от 78 до 675 К. Из полученной зависимости дифференцированием по температуре мы вычислили коэффициент термоэдс никеля. Для сравнения с “эталоном” мы измеряли коэффициент термоэдс ленты никеля (99.9%, толщина 0.1 мм) дифференциальным методом с помощью различных термопар в интервале температур 78–675 К. В ходе измерения коэффициента термоэдс никеля с помощью дифференциальных термопар нихросил–нисил (тип N) выяснилось, что в ГОСТ Р 8.585-2001 (сентябрь 2010 г.) и IEC60584-1 (2013 г.) для этой термопары указаны не совсем достоверные данные. Приведенные в ГОСТ и IEC полиномы термоэдс для термопар типа N сшиты при температуре 0 °С, но производная термоэдс по температуре имеет разрыв при указанной температуре, что фактически не дает возможности использовать данную термопару при данной температуре в дифференциальной методике, так как функция коэффициента термоэдс вблизи указанной температуры негладкая. В результате мы откалибровали термопару типа N относительно меди ниже температуры 67 °С, а также относительно платины выше температуры 67 °С и получили интерполяционную функцию для ее коэффициента термоэдс. Полные калибровочные данные термоэдс для термопары типа N в температурном диапазоне от –195 до 402 °С приведены в Приложении.

2. УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕРМОЭДС

Образец с закрепленными на нем термопарами и градиентным нагревателем помещался в оригинальную измерительную вставку (рис. 1), в объем которой после откачки форвакуумным насосом (давление ниже $1 \cdot 10^{-1}$ Па) подавался теплообменный газ (гелий). Для создания температурного хода в процессе измерения вставка плавно опускалась в транспортный сосуд Дьюара с жидким азотом. Массивная медная проставка 2 предназначена для выравнивания температуры между внутренней частью вставки с образцом и внешним медным кожухом 7, т.е. снижения градиента температур при температурной развертке. Для той же цели служит и медный держатель 4 для образцов, на который навинчивается медный тепловой экран 6. Тепловой развязкой между двумя тепловыми контурами служит тонкостенная нержавеющая трубка 3. Для тепловой развязки от комнатной температуры также используется длинная тонкостенная нержавеющая трубка. Температура контролировалась калиброванным платиновым термометром сопротивления Pt100. Электросопротивление термометра измерялось четырехконтактным методом. Измерения проводились 6½-разрядным вольтметром Keysight 34465A с использованием системы коммутации Rigol M302 с блоком

мультиплексора Rigol MC3120. Для измерений коэффициента термоэдс дифференциальным методом выше комнатной температуры вставка с образцом помещалась в вакуумную печь с откачкой турбомолекулярным насосом (давление ниже $1 \cdot 10^{-3}$ Па).

Рис. 1. Схема измерительной установки...

Для калибровки термопарной проволоки использовалась измерительная вставка, подобная приведенной на рис. 1. Диаметр термопарных проволок составлял 0.05 мм. В данном случае температура контролировалась паспортизованным платиновым низкотемпературным образцовым термометром сопротивления ТСПН-4М. Электросопротивление термометра измерялось четырехконтактным методом при двух направлениях тока, чтобы исключить вклад термоэдс. Измерения проводились с помощью системы сбора данных Keysight DAQ970A со встроенным $6\frac{1}{2}$ -разрядным вольтметром и мультиплексором Keysight DAQM901A. Один спай термопарной и медной проволок закреплялся на термометре ТСПН-4М с помощью серебряной пасты. Оба плеча термопары выводились из объема вставки в зону комнатной температуры. Спай холодного конца термопарной и медной проволок находился при температуре 0 °С в снежной каше. Таким образом, значения термоэдс термопарной проволоки ниже температуры 67 °С измерялись относительно меди, выше – относительно платины. Термоэдс проволоки никеля измерялась тем же способом (относительно платины). Для измерений термоэдс никеля термопарных проволок выше температуры 67 °С вставка с образцом помещалась в печь с атмосферой воздуха.

3. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕРМОЭДС

Для измерения коэффициента термоэдс был использован дифференциальный метод измерения, подобный описанному в работе [5]. Методика измерения в настоящей работе заключалась в том, что на поверхности образца с помощью электропроводящей серебряной пасты закреплялись либо две термопары нихросил–нисил (тип N, $\varnothing = 0.05$ мм) либо две термопары медь–константан (тип T, $\varnothing = 0.05$ мм). В дополнение к достаточно малому диаметру термопарных проволок дополнительно была увеличена их длина путем скручивания в спираль для увеличения их термосопротивления и повышения точности измерений. Толщина слоя пасты между спаем термопары и образцом делалась минимально возможной для достижения лучшего теплового контакта. К торцу образца подводился градиентный нагреватель 7 (рис. 1). Другим торцом образец закреплялся на массивный медный радиатор с помощью слоя серебряной пасты минимально возможной толщины. В качестве нагревателя выступал платиновый терморезистор Pt1000 на корундовой подложке. Таким образом, тепловой поток нагревателя создавал градиент температур $\Delta T = T_2 - T_1$, измеряемый с помощью падения напряжения на верхнем (ΔU_{up}) и нижнем (ΔU_{down}) спаях термопар. При проведении измерений термоэдс должно соблюдаться

следующее условие: образец и подводящие провода термопар гомогенны, из чего следует, что их коэффициенты термоэдс зависят только от температуры. Для расчета коэффициента термоэдс образца необходимо измерить градиент температур ΔT между верхним и нижним спаями термопар и разность потенциалов между одноименными плечами термопар (ΔU_{Neg} , ΔU_{Pos}). Падение напряжения между одноименными плечами термопар будет определяться формулой [2]

$$-\Delta U_{\text{Neg,Pos}} = \int_{T_2}^{T_0} S_{\text{Neg,Pos}} dT + \int_{T_1}^{T_2} S dT + \int_{T_0}^{T_1} S_{\text{Neg,Pos}} dT, \quad (1)$$

$$\Delta U_{\text{Neg,Pos}} = - \int_{T_1}^{T_2} (S - S_{\text{Neg,Pos}}) dT, \quad (2)$$

где T_0 – температура радиатора (вставка на рис. 1), $S_{\text{Neg,Pos}}$ – коэффициент термоэдс одного из плеч термопары, S – коэффициент термоэдс образца, который будет определяться формулой

$$S(\bar{T}) \approx -\frac{\Delta U_{\text{Neg}}}{\Delta T} + S_{\text{Neg}}(\bar{T}) = -\frac{\Delta U_{\text{Pos}}}{\Delta T} + S_{\text{Pos}}(\bar{T}), \quad (3)$$

где $\Delta T = T_2 - T_1$, а $\bar{T} = (T_2 + T_1)/2$.

Основным недостатком формулы (3) является то, что при достаточно малых значениях ΔT нужно учитывать наличие паразитных напряжений измерительной системы. Они могут возникать из-за плохого термического контакта к образцу, градиентов температур между электрическими контактами или негомогенности подводимых к образцу термопар [2, 6, 7], из-за чего формула (3) используется преимущественно в стационарном режиме измерения с большими значениями ΔT (более 10 °С). При проведении измерений коэффициента термоэдс в квазистационарном режиме с постоянными нагревами и охлаждениями образца градиентным нагревателем расчеты коэффициента термоэдс по формуле (3) могут приводить к серьезной ошибке. Поэтому для выполнения преобразования формулы (2) в формулу (3) необходимо, чтобы величина ΔT была как можно меньше. В литературе для измерения коэффициента термоэдс в квазистационарных условиях стремятся создать градиент температуры, не превышающий 2 °С.

Градиент температур между спаями термопар $\Delta T = T_2 - T_1$ можно определить двумя способами:

$$\Delta T = \frac{\Delta U_{\text{up}} - \Delta U_{\text{down}}}{S_{\text{Neg}}(\bar{T}) - S_{\text{Pos}}(\bar{T})}, \quad (4)$$

где ΔU_{up} – падение напряжения на термопаре, расположенной ближе к нагревателю, а ΔU_{down} – на термопаре, расположенной ближе к радиатору, и

$$\Delta T = \frac{\Delta U_{\text{Neg}} - \Delta U_{\text{Pos}}}{S_{\text{Neg}}(\bar{T}) - S_{\text{Pos}}(\bar{T})}. \quad (5)$$

Из уравнения (5) следует, что для измерения коэффициента термоэдс можно использовать всего два измерения: ΔU_{Neg} , ΔU_{Pos} . Но при этом практически невозможно точно определить $\bar{T}$, а при значениях коэффициента термоэдс образца, сравнимых с коэффициентом

термоэдс одной из ветвей термопары, будет возрастать ошибка измерения, о чем будет сказано далее.

Точность измерения разности температур мы повышаем путем калибровки термопар, но при измерении разности потенциалов всегда будет присутствовать паразитное напряжение от измерительной аппаратуры. Одним из известных методов борьбы с ним является линейная аппроксимация $(ax+b)$ зависимости напряжения ΔU от градиента температур ΔT в ходе одного цикла нагрева или охлаждения, создаваемого градиентным нагревателем на торце образца. Тогда формула (3) примет вид

$$S(\bar{T}) = -\frac{\partial \Delta U_{\text{Neg}}}{\partial \Delta T} + S_{\text{Neg}}(\bar{T}), \quad (6)$$

$$S(\bar{T}) = -\frac{\partial \Delta U_{\text{Pos}}}{\partial \Delta T} + S_{\text{Pos}}(\bar{T}). \quad (7)$$

В таком случае нас будет интересовать только наклон зависимости $\Delta U(\Delta T)$, а величина паразитного напряжения будет равна значению b из линейной аппроксимации.

По аналогии можно вывести формулу, где для нахождения коэффициента термоэдс образца не нужно знать конкретные значения ΔT . Путем подстановки градиента температур (5) в формулу (3) и проведения дифференцирования по ΔU_{Neg} или ΔU_{Pos} можно получить следующее уравнение

$$S(\bar{T}) = \frac{S_{\text{Pos}}(\bar{T}) - S_{\text{Neg}}(\bar{T})}{1 - \frac{\partial \Delta U_{\text{Pos}}}{\partial \Delta U_{\text{Neg}}}} + S_{\text{Neg}}(\bar{T}), \quad (8)$$

где коэффициент термоэдс образца можно рассчитать из линейной аппроксимации зависимости ΔU_{Pos} от ΔU_{Neg} .

Для проведенных нами экспериментов на рис. 2 показана характерная линейная зависимость напряжений одноименных плеч термопар нисил/нихросил ΔU для образца никеля от создаваемого температурного градиента ΔT при температуре 301 К. Как видно на рисунке, при данной температуре бóльшую точность определения коэффициента термоэдс образца обеспечивают расчеты по плечам нихросила ($R^2 > 0.999$).

Рис. 2. Зависимости напряжений одноименных плечей термопар нисил/нихросил ...

Значения коэффициента термоэдс образца, вычисленные по формулам (6)–(8), в идеальных условиях совпадают. Если величина коэффициента термоэдс образца становится сравнимой с величиной коэффициента термоэдс термопары, то измеряемое значение ΔU становится слишком маленьким, что может давать ошибку при расчетах линейной аппроксимации ΔU_{Pos} от ΔU_{Neg} для формулы (8) и ΔU от ΔT по одной из формул (6) или (7). Из этого следует, что для получения корректного значения коэффициента термоэдс нельзя ограничиваться измерением только через одни одноименные плечи термопар, а необходимо

выбирать температурные диапазоны, где одна или другая формула дает более корректные значения.

Для понимания того, какие значения в каком интервале температур будут являться более точными, не обязательно вручную просматривать все полученные результаты. Можно воспользоваться величиной коэффициента детерминации R^2 для полученных линейных зависимостей ΔU от ΔT . Этот коэффициент показывает, насколько линейно аппроксимируются экспериментальные зависимости $\Delta U(\Delta T)$, и в большинстве случаев его значения лежат в диапазоне от 1 до 0.999. В свою очередь, если величина R^2 меньше 0.999, это может говорить о неточности измерений вследствие слишком малых измеряемых вольтметром значений напряжения или при резких изменениях температуры. Если убедиться в отсутствии этих двух факторов, то по уменьшению R^2 можно судить о деградации образца или контактов в ходе эксперимента [7, 8].

На рис. 3 приведена температурная зависимость коэффициента детерминации R^2 напряжений одноименных плеч термопар нисила $\Delta U_{\text{NiSi}}(\Delta T)$ и нихросила $\Delta U_{\text{NiCrSi}}(\Delta T)$ для образца никеля, рассчитанная из наших экспериментальных данных. Как следует из рисунка, в нашем случае необходимо использовать в расчетах коэффициента термоэдс никеля одноименные плечи нихросила, так как значение величины R^2 остается больше 0.9997 на всем температурном интервале. Для нисила значения коэффициента детерминации R^2 гораздо хуже из-за близости значений коэффициента термоэдс никеля и коэффициента термоэдс нисила, что особенно видно при температуре около 300 °С, где их значения равны (рис. 3)

Рис. 3. Температурная зависимость коэффициента детерминации R^2 напряжений ...

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В ходе измерений выяснилось, что данные для коэффициента термоэдс термопары нихросил–нисил (тип N) из ГОСТ Р 8.585-2001 или из IEC60584-1 не пригодны для дифференциальной методики измерения коэффициента термоэдс образцов, так как функция имеет разрыв 0.2 мкВ при температуре 0 °С (рис. 4). Согласно ГОСТ, сама температурная зависимость термоэдс гладкая и сшита при температуре 0 °С, но ее производная имеет разрыв в этой точке. Данные коэффициента термоэдс для термопары типа N из монографии [9] ниже температуры 0 °С совпадали с ГОСТ Р 8.585-2001, а выше 0 °С различались (рис. 4). В результате нами были откалиброваны термопарные провода типов N и T. Результирующая температурная зависимость коэффициента термоэдс для термопары типа N показана на рис. 4. В Приложении мы приводим данные отдельно для каждого из плеч термопары типа N, а также аппроксимирующие полиномы для термоэдс в интервале температур от –195 до 402 °С.

Рис. 4. Температурная зависимость коэффициента термоэдс термопары нихросил–нисил ...

На рис. 5 показаны наши экспериментальные данные температурной зависимости коэффициента термоэдс никеля в интервале от 78 до 350 К, измеренные с помощью различных типов термопар, и их сравнение с данными из работ Каски и др. [1] и Буркова и др. [2]. Видно, что наши данные хорошо соотносятся с доступными данными других авторов. Ниже температуры 160 К данные [1] незначительно отклоняются от наших измерений. Мы не знаем, чем объяснить такое поведение зависимости, полученной в работе [1], так как три наших различных измерения не показали подобного отклонения. Значения коэффициента термоэдс никеля, измеренного дифференциальным методом с помощью нихросил–нисил термопары (тип N), наиболее близки к нашим измерениям интегральным методом, которые выступают в роли эталонных. Интегральный метод лишен недостатков дифференциальной методики и ограничен только точностью измерения термоэдс и необходимостью поддержания постоянной температуры холодного конца спая. Немного больше разница эталонных значений и значений, полученных при измерении дифференциальным методом с помощью медь–константан термопары (тип T). Мы связываем это с тем, что при использовании термопар типа T мы можем иметь большую неточность в определении градиента температур ΔT , чем при использовании термопар типа N. Объясним более детально. При измерениях ниже комнатной температуры образец никеля находился в атмосфере гелия для обеспечения теплообмена с внешним экраном измерительной ячейки 6 (рис. 1). В термопаре T-типа коэффициент теплопроводности меди составляет почти 400 Вт/(м·К), константана равен 21–22 Вт/(м·К) при температуре 300 К; в термопаре N-типа коэффициент теплопроводности у нихросила равен 13 Вт/(м·К), у нисила составляет 24 Вт/(м·К) при температуре 300 К [9]. Соответственно, при использовании термопар T-типа теплоотвод по гелию был больше, чем при использовании термопар N-типа. В результате термопары T-типа показывали немного заниженное значение градиента температур ΔT и, соответственно, немного завышенное значение коэффициента термоэдс S никеля, что мы и наблюдаем на рис. 5. Теплоотвод по самим термопарам был минимизирован путем использования проволоки с достаточно малым диаметром и увеличения их длины скручиванием спиралью. Также существенный вклад в точность измерений градиента температур ΔT вносит качество теплового контакта между образцом и спаем термопары. Во-первых, теплопроводность пасты должна быть достаточной. Во-вторых, как мы выяснили, толщина слоя пасты должна быть минимальной. Мы проводили эксперименты с тремя серебряными пастами: EPO-ТЕК H20E, Контактол (Keller), Dotite D-550. Результаты измерения коэффициента термоэдс никеля с использованием пасты EPO-ТЕК H20E оказались наиболее воспроизводимыми: различия между разными экспериментами составляют не более 2%. При этом все три пасты дают результаты, отличающиеся друг от друга не более чем на 8% (не более ± 0.7 мкВ/К величины коэффициента термоэдс никеля при комнатной температуре). В

настоящей работе приведены результаты измерения коэффициента термоэдс никеля с использованием проводящей серебряной пасты ЕРО-ТЕК Н20Е, коэффициент теплопроводности которой составляет 29 Вт/(м·К).

Рис. 5. Температурная зависимость коэффициента термоэдс никеля

На рис. 6 показаны наши экспериментальные данные температурной зависимости коэффициента термоэдс никеля в диапазоне от 300 до 675 К, измеренные с помощью термопар N-типа, и их сравнение с данными из других работ [2–4]. Видно, что наши данные хорошо совпадают с данными других авторов, различия составляют не более 4% в разных температурных интервалах.

Рис. 6. Температурная зависимость коэффициента термоэдс никеля

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе освещены некоторые моменты, которые необходимо учитывать экспериментаторам при измерении коэффициента термоэдс материалов дифференциальным методом. Для вычисления коэффициента термоэдс образца в данной методике необходимо выбирать формулы для отрицательных (6) либо положительных (7) плеч термопар, где значение коэффициента детерминации R^2 ближе к единице. Мы показали, что теплопроводность термопары может влиять на точность измерения коэффициента термоэдс образца. Крайне важно обеспечивать хороший тепловой контакт спая термопар с образцом, например с помощью достаточно хорошо электропроводящей (теплопроводящей) пасты. Экспериментальные данные, полученные с использованием ГОСТ Р 8.585-2001 и IEC60584-1 для обработки результатов измерения коэффициента термоэдс дифференциальной методикой с помощью термопар типа N, могут содержать существенные ошибки в области температуры 0 °С. Необходимо либо предварительно калибровать используемые термопары, либо пользоваться данными из монографии [9] или нашими калибровками, которые мы приводим в Приложении.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны. А.Н. Лаврову и К.Р. Жданову за помощь и плодотворное обсуждение полученных результатов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИНХ СО РАН в области фундаментальных научных исследований (тема №125021001790-0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Caskey G.R., Sellkyer D.J., Rubin L.G.* Rev. Sci. Instrum. 1969. V. 40. № 10. P. 1280. <https://doi.org/10.1063/1.1683764>
2. *Burkov A.T., Heinrich A., Konstantinov P.P., Nakama T., Yagasaki K.* Meas. Sci. Technol. 2001. V. 12. P. 264. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/12/3/304>
3. *Abadlia L., Gasser F., Khalouk K., Mayoufi M., and Gasser J. G.* Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 85. P. 095121. <https://doi.org/10.1063/1.4896046>
4. *Ponnambalam V., Lindsey S., Hickman N. S., Tritt T.M.* Rev. Sci. Instrum. 2006. V. 77. P. 073904. <https://doi.org/10.1063/1.2219734>
5. *Бурков А.Т., Федотов А.И., Касьянов А.А., Пантелеев Р.И., Накама Т.* Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 2. С. 173. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2015-15-2-173-195>
6. *Borup K.A., Boor J., Wang H., et al.* Energy Environ. Sci. 2015. V. 8. P. 423. <https://doi.org/10.1039/C4EE01320D>
7. *Boor J. and Müller E.* Rev. Sci. Instrum. 2013. V. 84. P. 065102. <https://doi.org/10.1063/1.4807697>
8. *Dasgupta T., Yin H., Boor J., Stiewe C., Iversen B.B., Müller E.* J. Electron. Mater. 2013. V. 42. P. 1988. <https://doi.org/10.1007/s11664-013-2490-6>
9. *Burley N.A., Powell R.L., Burns G.W., Scroger M.G.* The NICROSIL versus NISIL THERMOCOUPLE: Properties and Thermoelectric Reference Data. Washington: National Bureau of Standards Monograph, 1978.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Ниже приведены аппроксимирующие полиномы для зависимости экспериментальных значений термоэдс E нихросила и нисила от температуры T . Термоэдс E выражена в вольтах, а температура в градусах Цельсия.

Таблица 1. Аппроксимирующие полиномы для зависимостей термоэдс E нихросила от температуры T в интервале от -195 до 402 °С, измеренные относительно меди ниже температуры 67 °С и относительно платины выше температуры 67 °С

$E = \sum_i^7 A(i) T^i$ от -195 °С до 0 °С относительно меди	$E = \sum_i^8 B(i) T^i$ от 0 °С до 67 °С относительно меди	$E = \sum_i^9 C(i) T^i$ от 67 °С до 402 °С относительно платины
$A(0) = 0$ $A(1) = -9.58177 \cdot 10^{-6}$ $A(2) = -8.16388 \cdot 10^{-9}$ $A(3) = 1.35209 \cdot 10^{-11}$ $A(4) = -5.66396 \cdot 10^{-14}$ $A(5) = -1.60021 \cdot 10^{-16}$ $A(6) = -6.96389 \cdot 10^{-19}$ $A(7) = -8.13146 \cdot 10^{-22}$	$B(0) = 0$ $B(1) = -9.58177 \cdot 10^{-6}$ $B(2) = -8.16388 \cdot 10^{-9}$ $B(3) = -7.02217 \cdot 10^{-13}$ $B(4) = 1.14901 \cdot 10^{-12}$ $B(5) = -2.65207 \cdot 10^{-14}$ $B(6) = 3.20129 \cdot 10^{-16}$ $B(7) = -2.01919 \cdot 10^{-18}$ $B(8) = 5.12745 \cdot 10^{-21}$	$C(0) = 0$ $C(1) = -15.29066 \cdot 10^{-6}$ $C(2) = -3.38975 \cdot 10^{-8}$ $C(3) = 1.43369 \cdot 10^{-10}$ $C(4) = -9.71662 \cdot 10^{-13}$ $C(5) = 4.67468 \cdot 10^{-15}$ $C(6) = -1.36197 \cdot 10^{-17}$ $C(7) = 2.31726 \cdot 10^{-20}$ $C(8) = -2.10995 \cdot 10^{-23}$ $C(9) = 7.85522 \cdot 10^{-27}$

Таблица 2. Аппроксимирующие полиномы для зависимостей термоэдс E нисила от температуры в интервале от -195 до 402 °С, измеренные относительно меди ниже температуры 60 °С и относительно платины выше температуры 60 °С

$E = \sum_i^{11} A1(i) T^i$ от -95 °С до 0 °С относительно меди	$E = \sum_i^8 B1(i) T^i$ от 0 °С до 60 °С относительно меди	$E = \sum_i^9 C1(i) T^i$ от 60 °С до 402 °С относительно платины
$A1(0) = 0$ $A1(1) = 1.57677 \cdot 10^{-5}$ $A1(2) = 1.68076 \cdot 10^{-8}$ $A1(3) = -9.77157 \cdot 10^{-11}$ $A1(4) = -1.2105 \cdot 10^{-12}$ $A1(5) = 4.06493 \cdot 10^{-14}$ $A1(6) = 8.32556 \cdot 10^{-16}$ $A1(7) = 5.27887 \cdot 10^{-18}$ $A1(8) = 3.24746 \cdot 10^{-21}$ $A1(9) = -1.13526 \cdot 10^{-22}$ $A1(10) = -5.16242 \cdot 10^{-25}$ $A1(11) = -7.23238 \cdot 10^{-28}$	$B1(0) = 0$ $B1(1) = 1.57677 \cdot 10^{-5}$ $B1(2) = 1.68076 \cdot 10^{-8}$ $B1(3) = -9.23451 \cdot 10^{-11}$ $B1(4) = 4.45056 \cdot 10^{-13}$ $B1(5) = 1.29572 \cdot 10^{-13}$ $B1(6) = -3.38343 \cdot 10^{-15}$ $B1(7) = 3.18793 \cdot 10^{-17}$ $B1(8) = -1.05178 \cdot 10^{-19}$	$C1(0) = 0$ $C1(1) = 1.05045 \cdot 10^{-5}$ $C1(2) = -2.13344 \cdot 10^{-8}$ $C1(3) = 3.30528 \cdot 10^{-10}$ $C1(4) = -2.796 \cdot 10^{-12}$ $C1(5) = 1.50484 \cdot 10^{-14}$ $C1(6) = -5.13937 \cdot 10^{-17}$ $C1(7) = 1.08212 \cdot 10^{-19}$ $C1(8) = -1.28468 \cdot 10^{-22}$ $C1(9) = 6.58231 \cdot 10^{-26}$

Коэффициент термоэдс нихросила–нисила вычисляем дифференцированием по температуре: $S = dE/dT$. Температурные зависимости коэффициента термоэдс для меди и платины можно найти, например, в работе [5]. Тогда искомые коэффициенты термоэдс нихросила и нисила вычисляются по формуле $S_{\text{NiCrSiI,NiSiI}} = S_{\text{Cu,Pt}} - S$.

На рис. 7, 8 приведены температурные зависимости коэффициента термоэдс нихросила и нисила в интервале температур от -195 до 402°C , полученные из наших экспериментальных данных путем дифференцирования термоэдс по температуре. На нижней панели представлены отклонения интерполяционной функции от экспериментальных данных.

Рис. 7. Температурная зависимость коэффициента термоэдс нихросила

Рис. 8. Температурная зависимость коэффициента термоэдс нисила

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Схема измерительной установки: 1 – выход к вакуумному насосу/баллону с газообразным гелием, 2 – медная проставка, 3 – тепловая развязка из тонкостенной нержавеющей трубки, 4 – медный держатель для образцов, 5 – сменный медный радиатор для установки образца, 6 – медный тепловой экран, 7 – градиентный нагреватель, 8 – медный кожух. На вставке – схема дифференциального метода измерения коэффициента термоэдс.
- Рис. 2.** Зависимости напряжений одноименных плеч термопар нисил/нихросил ΔU для образца никеля от создаваемого температурного градиента ΔT при температуре 301 К. Линиями показаны линейные аппроксимации экспериментальных данных.
- Рис. 3.** Температурная зависимость коэффициента детерминации R^2 напряжений одноименных плеч термопар нисила $\Delta U_{\text{NiSi}}(\Delta T)$ и нихросила $\Delta U_{\text{NiCrSi}}(\Delta T)$ для образца никеля в температурном интервале от 300 до 675 К.
- Рис. 4.** Температурная зависимость коэффициента термоэдс термопары нихросил-нисил (тип N): кружки – наши данные, квадраты – данные из монографии [9], треугольники – данные из ГОСТ Р 8.585-2001 или IEC60584-1.
- Рис. 5.** Температурная зависимость коэффициента термоэдс никеля в температурном интервале от 78 до 350 К: пустые кружки – наши данные, измеренные интегральным методом, заполненные кружки – наши данные, измеренные с помощью термопар нихросил–нисил (тип N), квадраты – наши данные, измеренные с помощью термопар медь–константан (тип T), треугольники – данные из работы [1], звездочки – данные из работы [2].
- Рис. 6.** Температурная зависимость коэффициента термоэдс никеля в температурном интервале от 300 до 675 К: пустые кружки – наши данные, измеренные интегральным методом, заполненные кружки – наши данные, измеренные с помощью термопар нихросил–нисил (тип N), звездочки – данные из работы [2], треугольники – данные из работы [4], квадраты – данные из работы [3].
- Рис. 7.** Температурная зависимость коэффициента термоэдс нихросила в интервале температур от –195 до 402 °С. На нижней панели представлены отклонения интерполяционной функции от экспериментальных данных.
- Рис. 8.** Температурная зависимость коэффициента термоэдс нисила в интервале температур от –195 до 402 °С. На нижней панели представлены отклонения интерполяционной функции от экспериментальных данных.

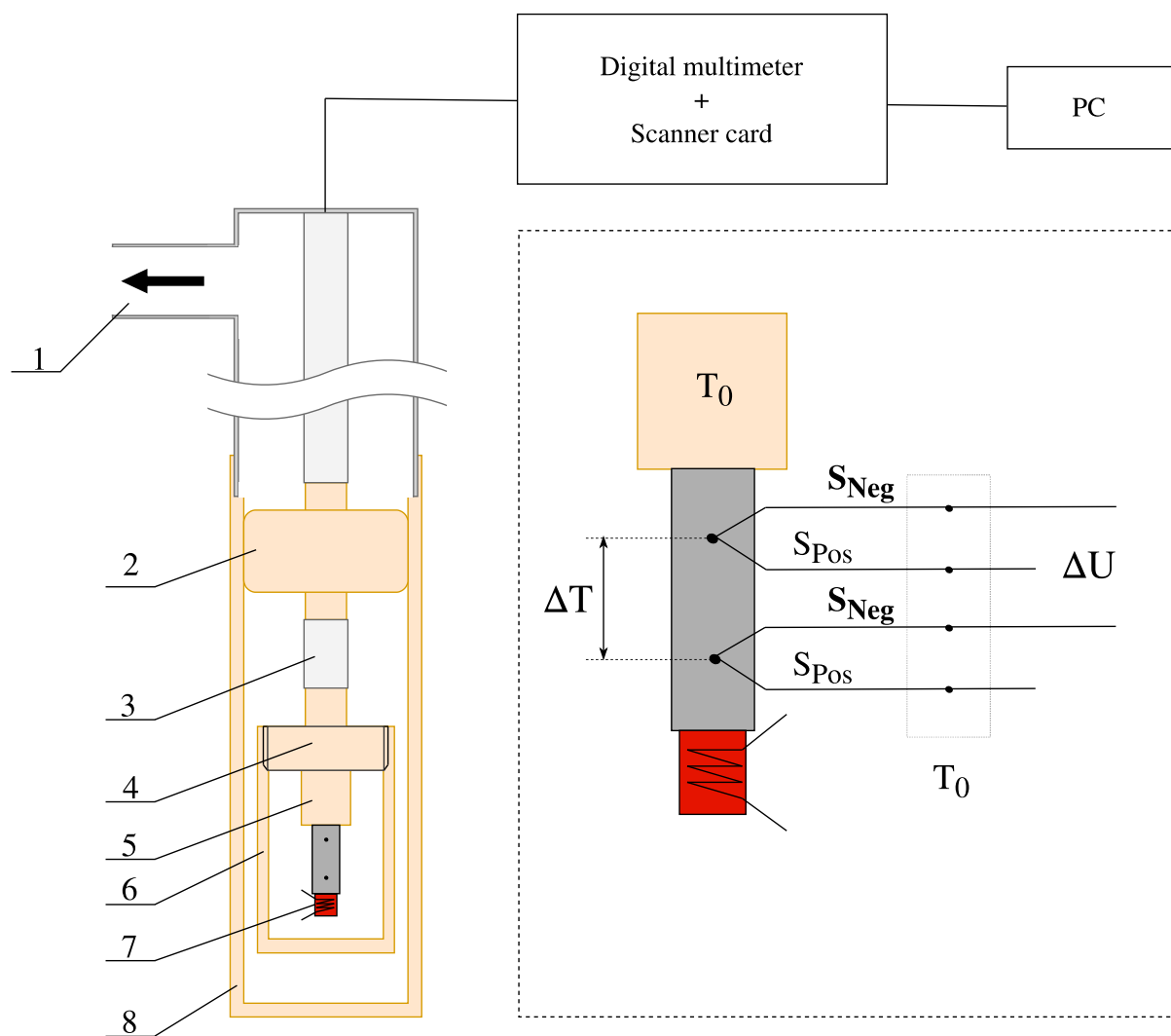


Рис. 1.

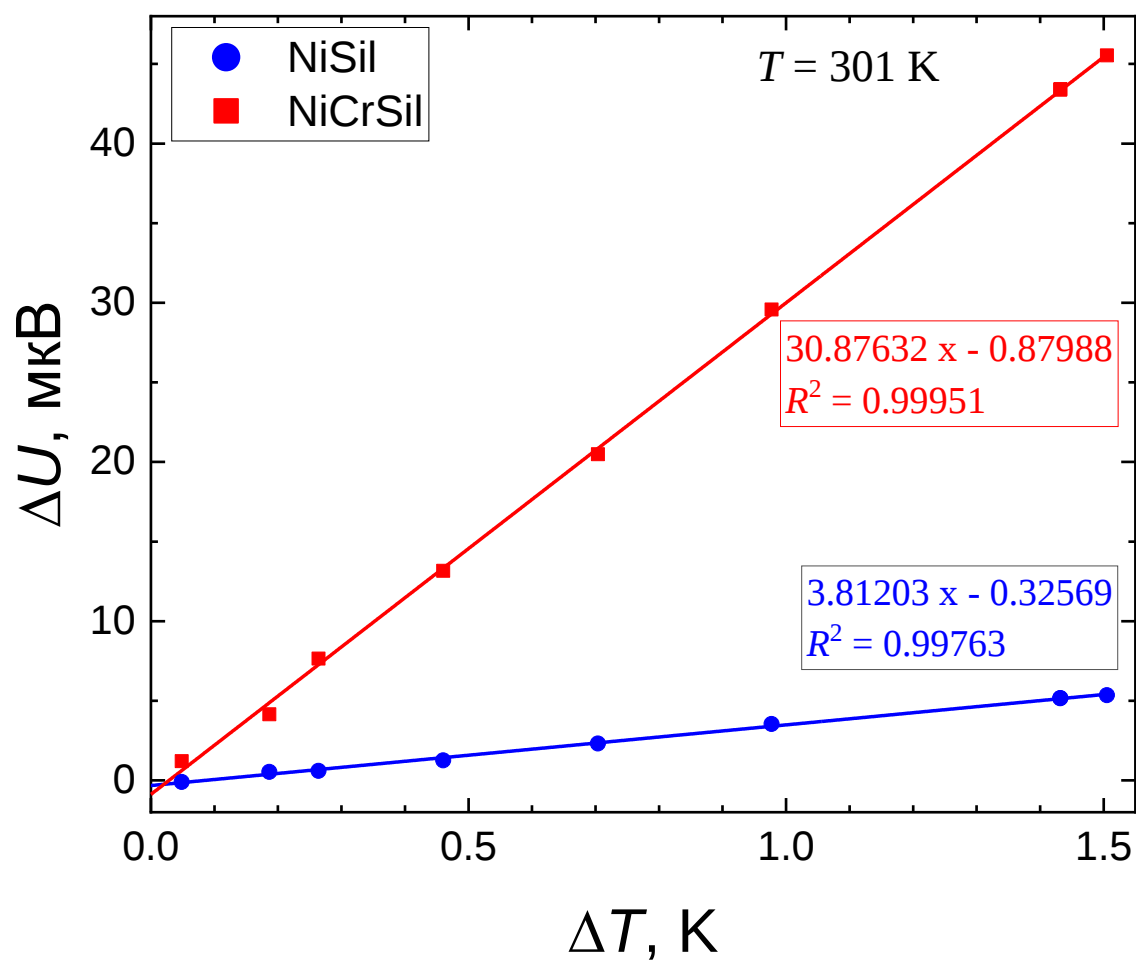


Рис. 2

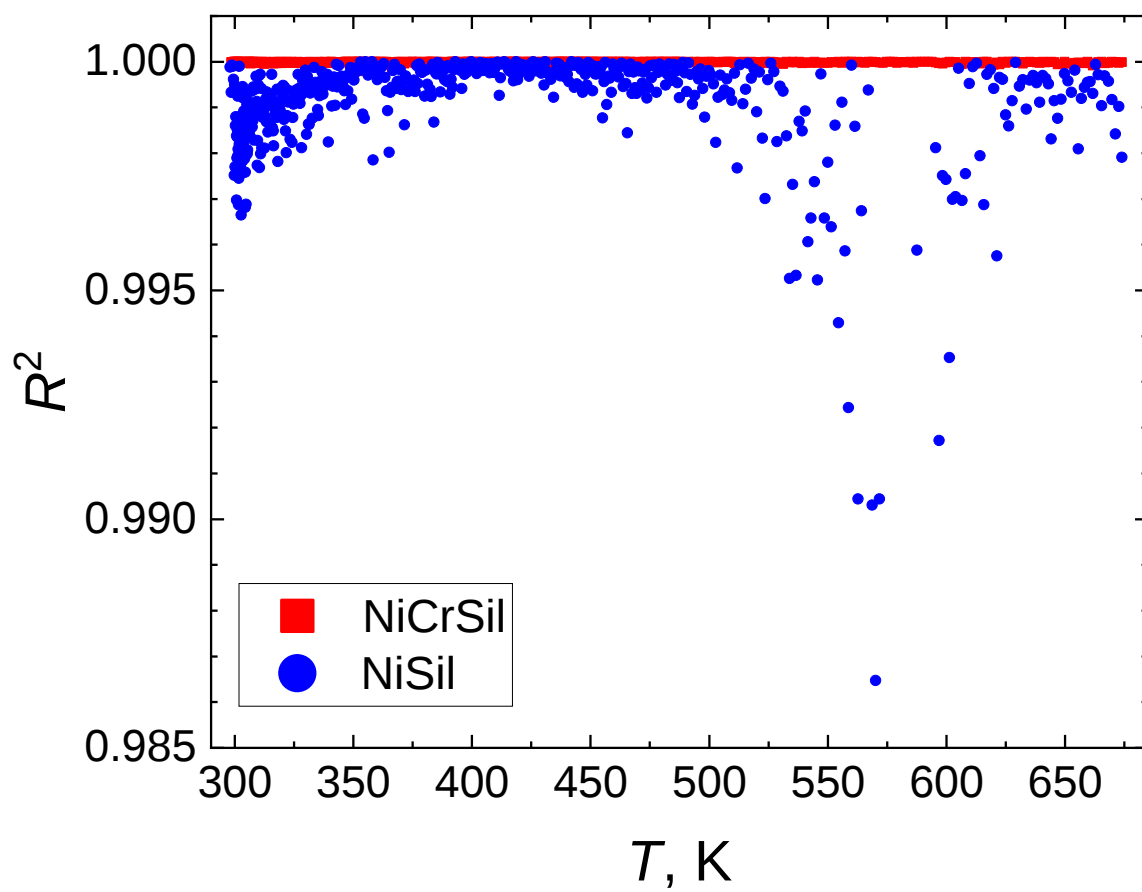


Рис. 3.

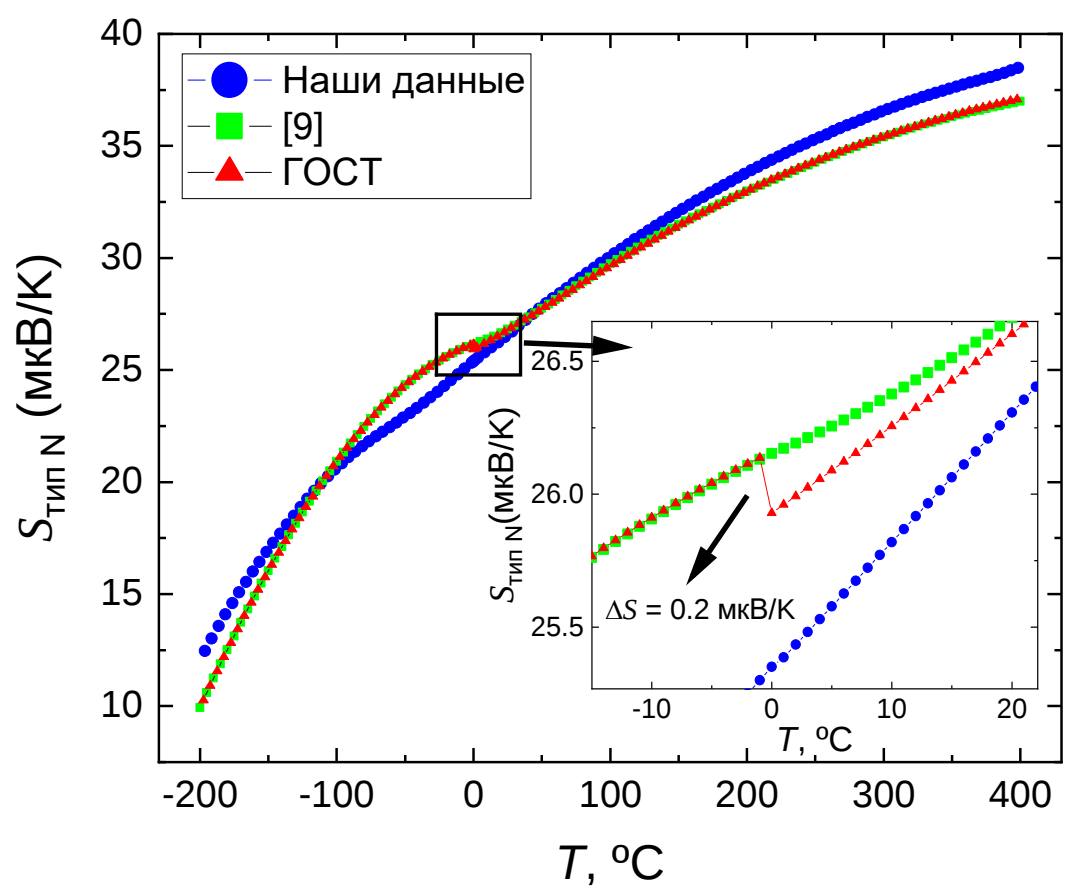


Рис. 4. .

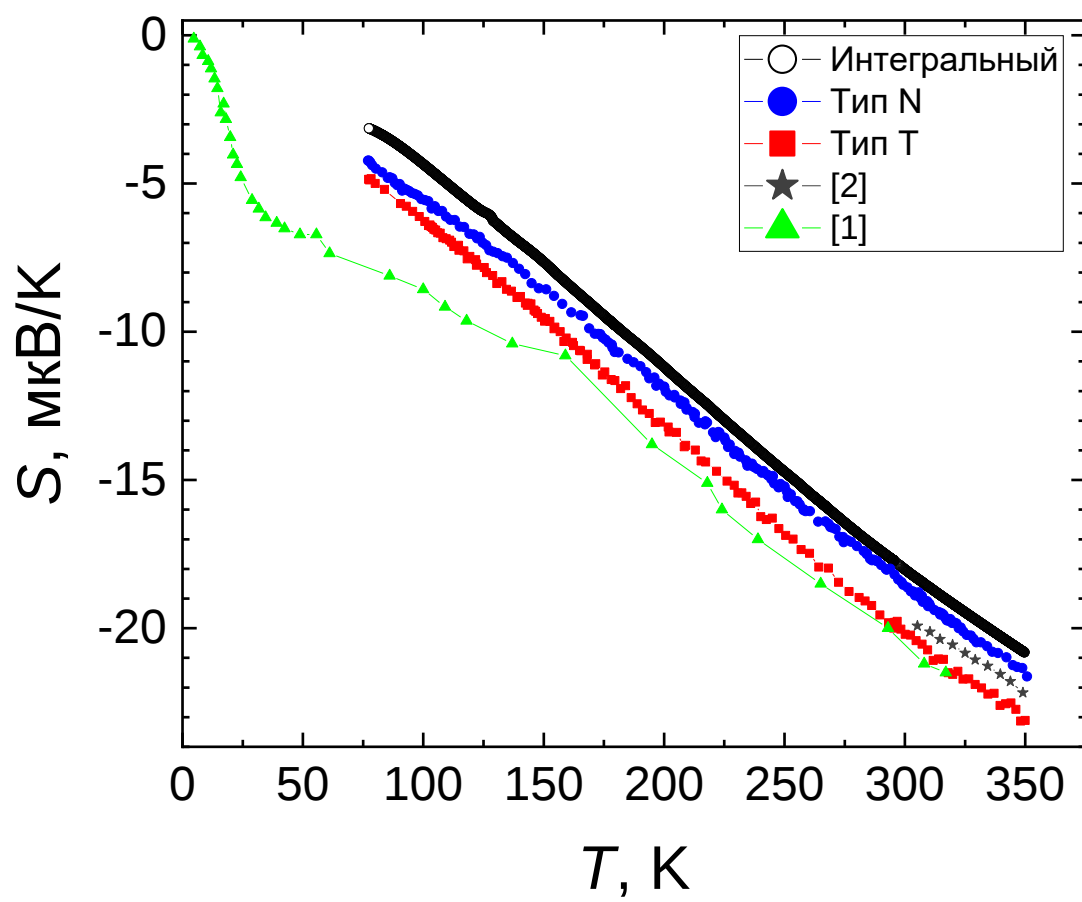


Рис. 5.

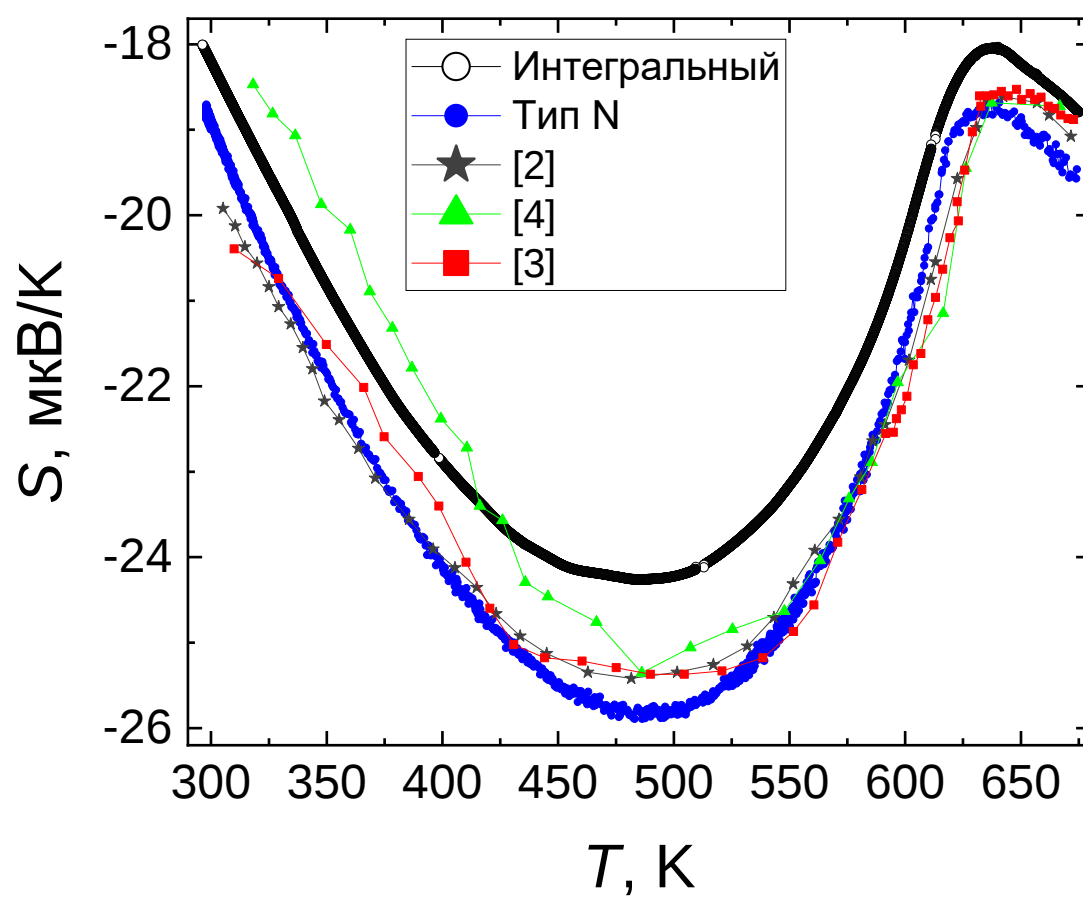


Рис. 6

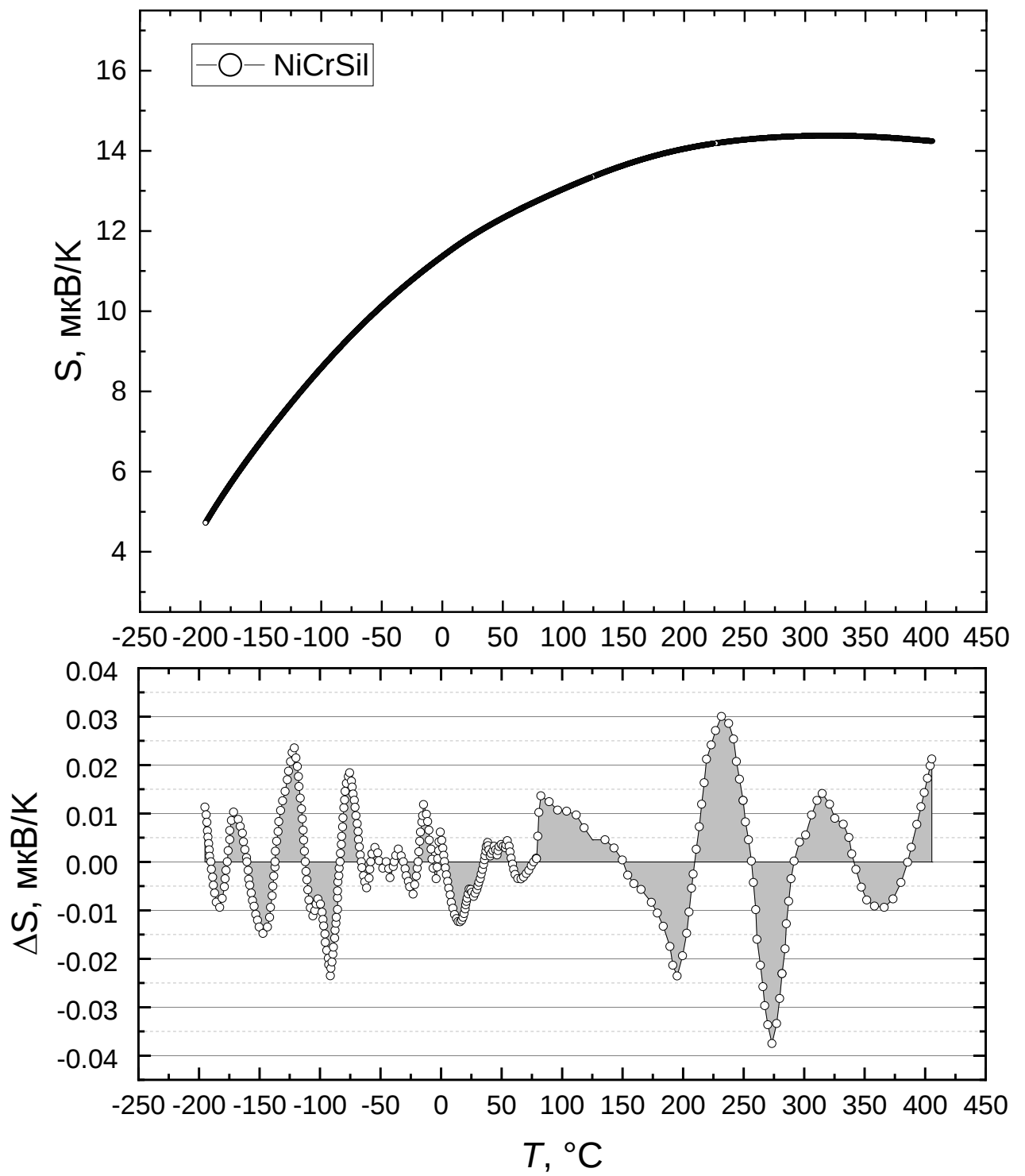


Рис. 7.

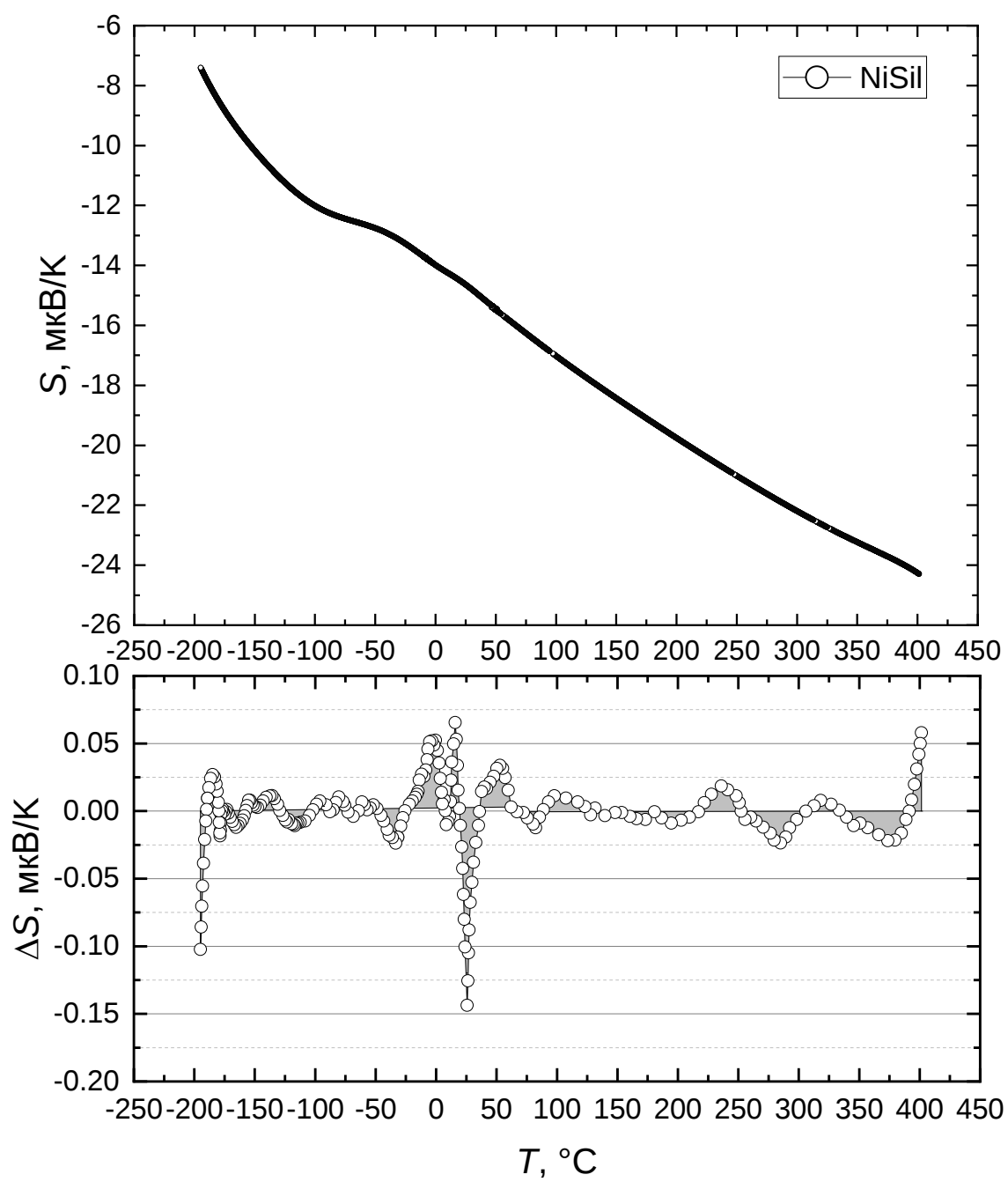


Рис. 8.