

doi: 10.24412/2687-1092-2023-10-415-421



DTS-ТЕРМОМЕТРИЯ В МОРСКИХ СКВАЖИНАХ: ПРИНЦИП И ОСОБЕННОСТИ КАЛИБРОВКИ ДАННЫХ

✉Тулапин А.В., Длугач А.Г., Рокос С.И., Куликов С.Н., Хомбак В.В., Емашкин И.А.

АО «Арктические Морские Инженерно-Геологические Экспедиции», Мурманск, Россия

✉AMIGE@rusgeology.ru

Применение технологии распределённых температурных датчиков успешно зарекомендовало себя при проведении температурных измерений в морских скважинах. Однако, несмотря на положительный опыт использования, вопрос о точности температурных измерений, выполненных в соответствии с данной методикой, остается открытым. Точность полученных температурных измерений в значительной степени зависит от процесса калибровки. В работе предложен новый подход к калибровке данных DTS в морских скважинах. Приведен пример температурных данных, полученных с использованием предложенной методики калибровки.

Ключевые слова: *скважинная термометрия, метод распределенных температурных датчиков, технология калибровки*

Введение. Начиная с конца 80-х начала 90-х годов прошлого столетия метод распределенных температурных датчиков (Distributed Temperature Sensing – DTS) начинает активно применяться в различных областях, где основным элементом является качественная оценка температур вдоль профиля измерений [Hartog, 2017]. На ранних этапах развития технология позволяла выявлять локации с резким изменением температур: пожары, в сфере охранной деятельности; прорывы и места утечек жидкостей вдоль трубопроводов и т.д. В этих случаях точные количественные оценки температуры не требовались.

С внедрением этой технологии в нефтегазовую промышленность возросли требования к точности количественных оценок. Одной из первых работ, посвященных оценке точности абсолютных температур с использованием технологии DTS, представляется экспериментальная работа коллектива ученых из Германии [Großwig et al., 1996]. В тестовой скважине они сравнили температурную кривую, полученную с помощью DTS, с данными высокоточных температурных датчиков и достигли практически идентичных температурных профилей. Заметной особенностью была более высокая частота дискретизации в случае температурных данных DTS, что обеспечивало лучшее разрешение. Однако, как подчеркивают авторы, точность абсолютных температурных измерений с использованием технологии DTS зависит от корректности применяемой калибровочной функции, которая, в свою очередь, зависит как от геометрии измерительной оптоволоконной линии, так и от химического состава оптического волокна. Согласно этой работе, при использовании корректной калибровочной функции точность измерений температуры может быть не хуже 0,3 °С, а разрешение – до 0,05 °С.

Технология DTS основана на принципе оптической рефлектометрии, при которой исследуется спектр обратного рассеяния, возбуждаемый в оптоволоконной линии посылаемым с определенной частотой лазерным импульсом. Возможность использования оптоволоконной линии в качестве распределённого датчика локальной температуры возникает в связи с зависимостью некоторых спектральных линий от температуры волокна. Оценивается отношение стоксовской и анти-стоксовской компонент обратно-рассеянного Рамановского излучения (первая из них практически не зависит от температуры, а вторая, имеет строгую зависимость от неё). Измеренные отношения конвертируются в абсолютные температуры путем калибровки на участках измерительной

линии с известными температурами. Привязка к участкам калибровки позволяет восстановить температурный профиль вдоль всей линии регистрации.

В практике измерений с использованием методики DTS принято выделять два вида калибровок: внутреннюю калибровку (или, калибровку измерительного блока) и внешнюю калибровку, при которой используются реперные участки измерительной линии с известными температурами [Hausner et al, 2011].

При внутренней калибровке измерительного блока реперные точки или участки измерения абсолютных температур находятся в буферной бухте оптического волокна, которое уложено в регистраторе DTS [Suarez et al, 2011]. В случае внешней калибровки, как правило, используются емкости с жидкостью известной температуры, через которые проходит оптический кабель перед погружением в скважину. Температуры в калибровочных емкостях измеряются высокоточными термометрами [Hausner et al, 2011].

Отношение мощностей стоксовской - $P_S(z)$ и антистоксовской - $P_{AS}(z)$ составляющих обратно-рассеянного сигнала в рамановском спектре связано с абсолютными температурами следующим уравнением [Hausner et al, 2011]:

$$T(z) = \frac{\gamma}{\ln \frac{P_S(z)}{P_{AS}(z)} + C - \Delta\alpha z}, \quad (1)$$

где γ [°K] представляет собой сдвиг энергии между фотоном на длине волны падающего лазера и рассеянным рамановским фотоном, C — безразмерный калибровочный параметр, который охватывает свойства падающего излучения лазера и самого прибора DTS, а $\Delta\alpha$ (m^{-1}) — разность коэффициентов затухания между антистоксовым и стоксовым сигналами в волокне.

Для определения трех неизвестных параметров в уравнении (1) требуется три независимых температурных измерения вдоль измерительной линии. Для корректного расчета калибровочной функции принципиальным является расстояние между участками калибровки. В силу затухания зондирующего сигнала вдоль линии регистрации, расстояние между референсными участками для калибровки должно быть максимальным. Последнее позволяет минимизировать ошибку определения параметров в уравнении (1). Очевидно, что если референсные участки для калибровки находятся в пределах референсной бухты, то определение абсолютных температур будет не совсем корректным, поскольку потери сигнала за длину измерительной линии не учитываются. В данном тезисе рассматривается новый подход к калибровке данных в морских скважинах.

Теоретические основы предлагаемой технологии калибровки. Предположим, что температурная кривая, полученная после внутренней калибровки (калибровки прибора), является неточной. Полагая, что параметры γ и C были учтены прибором в процессе внутренней калибровки, единственным существенным параметром, влияющим на корректную трансформацию в уравнении (1), является $\Delta\alpha$. Согласно работе Hausner et al [2011], если оптоволоконная линия регистрации не содержит участков с нелинейными и ступенчатыми потерями, которые обычно связаны с местами изгибов и переломов линии приема, параметр $\Delta\alpha$, согласно закону Бера (Beer's Law), может быть определен как угловой коэффициент прямолинейной функции измерений между двумя положениями точек z_1 и z_2 на измерительной линии следующим образом:

$$\Delta\alpha = \frac{\ln \frac{P_S(z_1)}{P_{AS}(z_2)} - \ln \frac{P_S(z_2)}{P_{AS}(z_1)}}{z_2 - z_1}. \quad (2)$$

По-видимому, прямолинейная зависимость должна быть справедлива и для некорректно откалиброванных данных. Некорректность будет выражаться в наклоне и сдвиге прямолинейной зависимости от истинного положения. Иными словами, если есть

два участка на измерительной линии, на которых истинные температуры известны, то наклон прямолинейной зависимости между данными участками z_1 и z_2 будут характеризовать истинное значение $\Delta\alpha$. Таким образом, искомая поправка будет определяться разностью наклонов прямолинейных функции истинных температур в точках измерений z_1 и z_2 , и тех, что получены в результате неправильно откалиброванных температурных кривых (внутренняя калибровка прибора). Введение данной корректирующей поправки (остаточной калибровочной функции) позволит привести температурный профиль после внутренней калибровки к предполагаемо истинным значениям.

Аппаратура и методика проведения температурных измерений. Тестирование калибровочной методики проводилось в пределах акватории восточно-арктического шельфа России - в одной из малоглубинных стратиграфических скважин, пробуренных в 2023 г.

Скважина была пробурена до глубины 286 м при глубине моря 38 м. Бурение проводилось колонной, собранной из труб СТБ-127 и УБТ-178 (низ колонны) с бурголовкой истирающе-режущего типа диаметром 215.9 мм. При бурении с отбором керна применялся съемный пробоотборник с внутренним диаметром 82 мм (диаметр керна). При бурении использовалась открытая система промывки скважины. Тип бурового раствора- глинистый.

Скважинная термометрия выполнялась с использованием блока регистрации "ASTRO E544" (производитель - компания ООО "Инверсия-сенсор" (Россия)). Условные сенсоры (дискретизация оптоволоконной линии) расположены через каждые 0.25 м. Разрешающая способность измерений не хуже 1 м.

В качестве измерительной линии использовался комбинированный оптоволоконный кабель СЛ – ОКМБ – 03НУ – 2Е+2М5 – 9.0 (включает пару одно- и многомодовых оптических волокон) производства “НПП Старлинк” (Россия). Скважинные DTS-измерения выполнялись на многогодомовом оптическом волокне.

Методика выполнения скважинных измерений включала: опускание оптоволоконной линии в скважину; подъем буровых труб; выстаивание скважины (установление естественных температур); DTS-измерения в скважине. Непосредственно перед скважинной термометрией, температура в водной толще была измерена с помощью комплексного зонда Valeport Midas SVX2, который обладает комбинированными функционалами SVP (sound velocity profiling) и CTD (conductivity, temperature and depth) датчиков. Точность измерения температур зондом Valeport Midas SVX2 составляла не хуже 0.01 °С при разрешающей способности 0.005 °С. Данные температурного профилирования в водной толще, полученные с помощью данного зонда использовались для предложенной технологии калибровки скважинных температурных измерений.

Принципиальная схема температурных измерений в скважине представлена на Рис.1

Запись температурного профиля в водной толще выполнялась с помощью зонда Valeport Midas SVX2: итерация 1 - при опускании зонда; итерация 2- при его поднятии. Результаты обеих измерений приведены на рис. 2. Заметим, что кривые несколько различаются. Возможно, это связано с тем, что перед погружением в воду зонд не "выстаивался" (температура датчика зонда не пришла в равновесие с температурой окружающей среды). Другой возможной причиной являются резкие рывки при опускании зонда в воду. В силу последнего, только температурный тренд, полученный при поднятии зонда, будет рассматриваться в последующей процедуре калибровки.

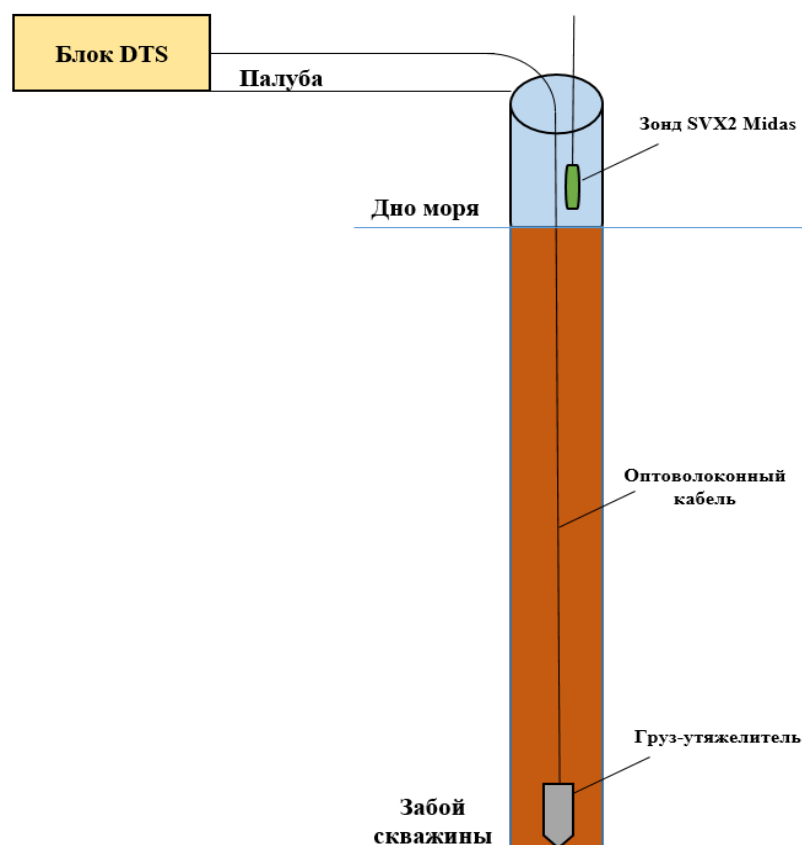


Рис. 1. Принципиальная схема проведения скважинных температурных измерений в морской скважине с помощью технологии DTS.

Калибровка скважинных данных DTS. На рис. 3-А представлен температурный профиль, полученный в водной толще при профилировании зондом Valeport Midas SVX2, в сравнении с температурной кривой DTS. Различие в определении температур в водной толще заметно. В то же время, следует отметить, что кривые близки по структурному рисунку.

На рис. 3-В приведена разностная функция между температурными кривыми в водной толще и прямолинейная функция, которая получена путем алгоритма линейной регрессии. Прямолинейная зависимость представляет собой функцию температурных поправок, которые будут применены к данным DTS, полученным после внутренней калибровки регистратора.

Рис. 3-С иллюстрирует окончательно откалиброванную температурную кривую DTS. Заметим, что участки профилей в водной толще практически идентичны.

Обсуждение результатов. Температурная кривая DTS после внутренней калибровки регистратора, как видно из Рис. 3-А, сдвинута примерно на 2 °С в область положительных температур. Несмотря на схожесть структурного рисунка температурных профилей в водной толще по данным комплексного зонда Valeport Midas SVX2 и данным DTS, и - на первый взгляд - разница температур кажется обусловленной сдвигом на определенную константу, более детальное рассмотрение выявляет, что сдвиг линейно нарастает (Рис. 3-В). Следует отметить, что дискретизация температурных измерений в водной толще анализируемыми методами различна: при измерениях DTS- шаг равномерный; при температурном профилировании с помощью Valeport Midas SVX2 - шаг непостоянный и зависит от скорости опускания зонда лебедкой. Следовательно, структурный рисунок температурных профилей различен в деталях. Аппроксимация разностной функции уравнением прямой с использованием линейной регрессии позволяет минимизировать различие температурных неоднозначностей и не противоречит закону Бера. Применение

калибровочной функции (Рис. 3-С) ко всей кривой DTS сдвигает данную температурную кривую в предпологаемо корректное положение (истинные температуры).

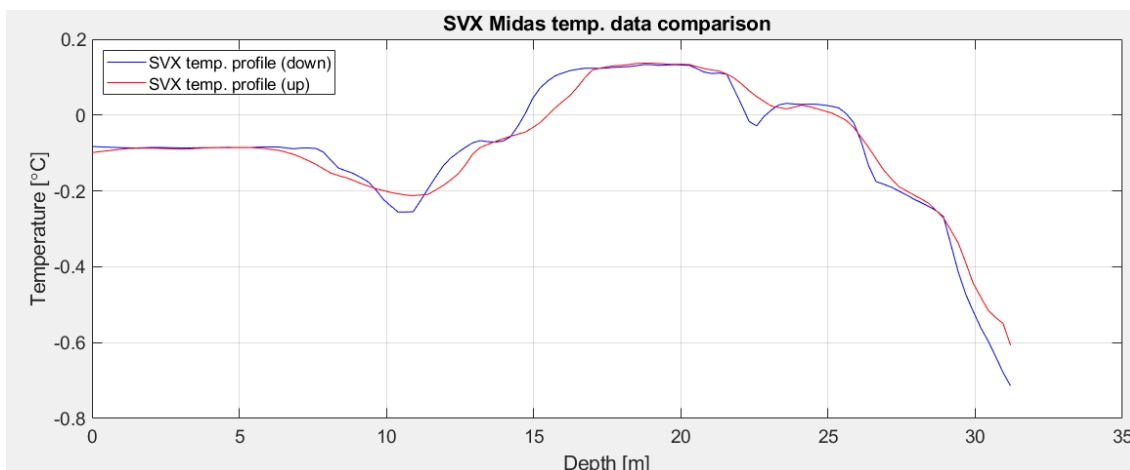


Рис. 2. Температурные профили в водной толще, полученные с помощью комплексного зонда Valeport Midas SVX2: синяя кривая- температурный профиль, полученный при опускании зонда; красная кривая- температурная кривая, полученная при поднятии зонда.

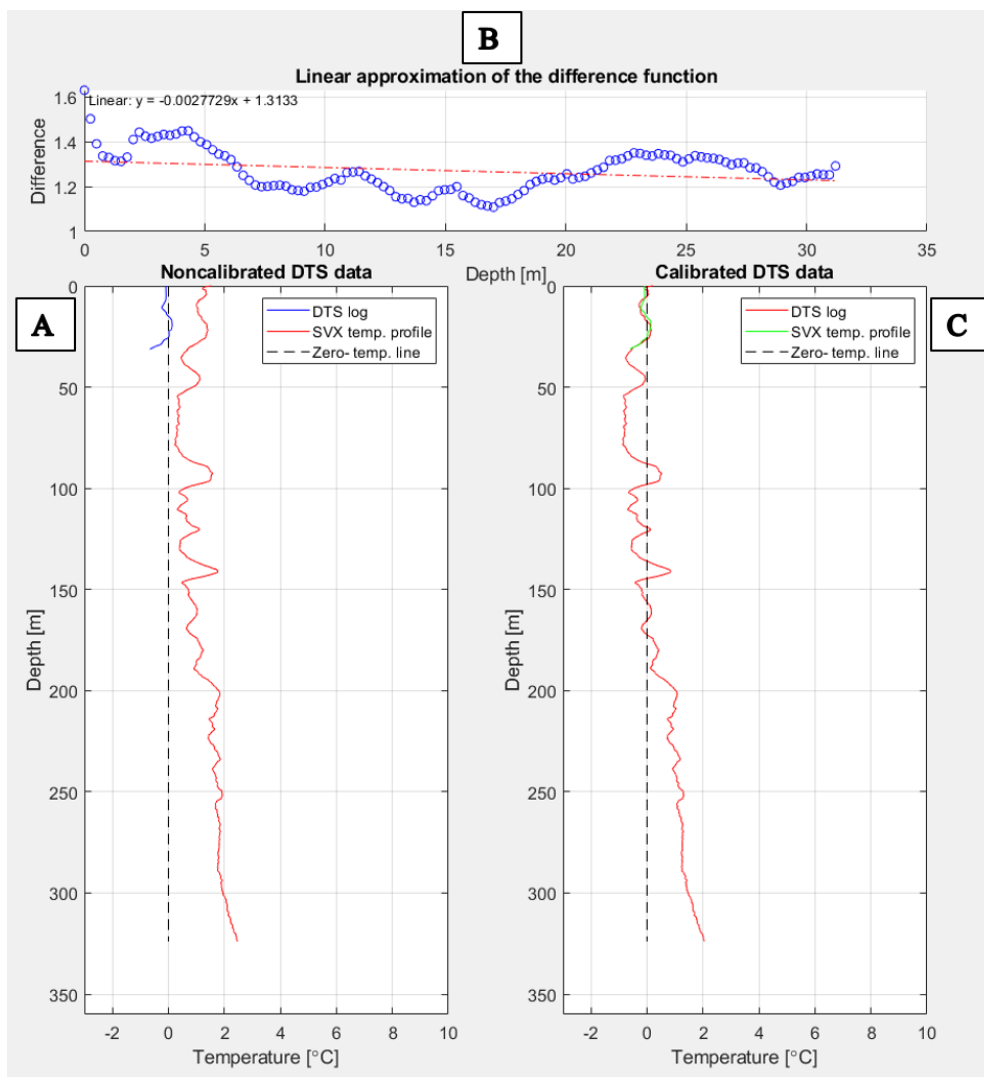


Рис. 3. Результаты калибровки данных DTS: А- данные до калибровки; В- разностная функция и уравнение линейной регрессии (калибровочная функция); С- откалиброванная температурная кривая DTS.

Корректность расчета параметра $\Delta\alpha$, как отмечено ранее, определяется расстоянием между точками измерений. Иными словами, точность приведенной калибровки будет непосредственно зависеть от длины участка, который рассматривался для калибровочных целей. Увеличение длины участка будет характеризоваться минимизацией ошибки, и наоборот.

Другим важным моментом является время проведения профилирования в водной толще (измерение профиля истинных температур для калибровки). По разным причинам, температурный профиль в водной толще может быть измерен несколько раньше или позже работ DTS. Поскольку гидрологический режим в арктическом бассейне, особенно летом, имеет свойство меняться достаточно быстро, разность времени проведения измерений, как показывает практика, может существенно усложнить процедуру корректной калибровки по предложенной методике.

Выводы и рекомендации. Анализ предложенного алгоритма калибровки скважинных температурных измерений по технологии DTS позволяет сделать следующие выводы:

- Алгоритм достаточно прост и показывает убедительные результаты на примере рассматриваемой скважины;
- Разность температур не определяется константным сдвигом: калибровочная функция представляет собой линейную зависимость;
- Точность предложенной калибровки во многом будет зависеть от длины участка измерительной линии, на котором выполняется калибровка, а также, от времени измерений температурного профиля, который рассматривается в качестве эталонного;
- Точность определения температур в скважине согласно предложенной калибровке необходимо сравнить с результатами других видов внешних (проверенных) калибровок.

ЛИТЕРАТУРА

Großwig S., Hurtig E., Kühn K. Fibre optic temperature sensing: A new tool for temperature measurements in boreholes // *Geophysics*. 1996. Vol. 61. No. 4. P. 1065-1067.

Hartog A.H. An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors (1st ed.). CRC Press. 2017. doi:10.1201/9781315119014

Hausner M.B., Suárez F., Glander K.E., van de Giesen N., Selker J.S., Tyler S.W. Calibrating single-ended fiber-optic Raman spectra distributed temperature sensing data // *Sensors (Basel)*. 2011. Vol. 11. Is. 11. P. 10859-79. doi: 10.3390/s111110859.

Suárez F., Aravena J. E., Hausner M. B., Childress A. E., Tyler S.W. Assessment of a vertical high-resolution distributed-temperature-sensing system in a shallow thermohaline environment // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2011. Vol. 15. Is. 3. P. 1081–1093, doi: 10.5194/hess-15-1081-2011

DTS SURVEY IN OFFSHORE BOREHOLES: PRINCIPLES AND METHODOLOGY OF DATA CALIBRATION

Tulapin A.V., Dlugach A.G., Rokos S.I., Kulikov S.N., Khombak V.V., Emashkin I.A.

JSC «AMIGE», Murmansk, Russia

The application of distributed temperature sensor technology has proven successful in conducting temperature measurements in offshore boreholes. However, despite positive usage experience, the question of the accuracy of temperature measurements performed according to this methodology is still under discussion. The accuracy of the obtained temperature measurements is significantly influenced by the calibration process. A new approach to calibrating DTS data in offshore wells is proposed in this work. An example of temperature data obtained using the proposed calibration methodology is provided.

Keywords: *wellbore thermometry, distributed temperature sensor method, calibration methodology*

REFERENCES

Großwig S., Hurtig E., Kühn K. Fibre optic temperature sensing: A new tool for temperature measurements in boreholes // *Geophysics*. 1996. Vol. 61. No. 4. P. 1065-1067.

Hartog A.H. An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors (1st ed.). CRC Press. 2017. doi:10.1201/9781315119014

Hausner M.B., Suárez F., Glander K.E., van de Giesen N., Selker J.S., Tyler S.W. Calibrating single-ended fiber-optic Raman spectra distributed temperature sensing data // *Sensors (Basel)*. 2011. Vol. 11. Is. 11. P. 10859-79. doi: 10.3390/s111110859.

Suárez F., Aravena J. E., Hausner M. B., Childress A. E., Tyler S.W. Assessment of a vertical high-resolution distributed-temperature-sensing system in a shallow thermohaline environment // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2011. Vol. 15. Is. 3. P. 1081–1093, doi: 10.5194/hess-15-1081-2011