

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 624.9

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО КОРОТКОБАЗИСНОГО ЦИФРОВОГО ДЕФОРМОМЕТРА С ПОМОЩЬЮ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ СТЕНДА

© 2024 г. А. Б. Манукин^{1,2}, В. В. Тимков¹, В. В. Савосин², М. А. Гинзбург^{1,*}

¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук,
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ул. Б. Грузинская, 10, Москва, 123242 Россия
*E-mail: gimaal@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.08.2023 г.

После доработки 09.10.2023 г.

Принята к публикации 05.02.2024 г.

В статье представлены результаты лабораторных испытаний деформометра короткобазисного цифрового (ДКЦ), разработанного для исследования деформационных процессов на трубопроводах и элементах инженерных конструкций, с изменениями, внесенными в его конструкцию и электронную часть, а также новая конструкция испытательного стенда. Представленные результаты показывают эффективность и точность новой методики проведения испытаний, что позволяет повысить достоверность получаемых результатов.

Ключевые слова: деформометр цифровой, динамический диапазон, чувствительность, крутизна преобразования, испытательный стенд

DOI: 10.31857/S0869780924020076; EDN: DZOPGG

Анализ результатов предварительных экспериментов с датчиком деформометра короткобазисного цифрового (ДКЦ) показал, что для улучшения результатов экспериментов по растяжению пластины подложки макета прибора необходимо внести доработки в электронную часть ДКЦ, а также изменить его конструкцию. Кроме того, предлагается переоборудовать испытательный стенд с переходом на вертикальный подвес.

В первую очередь это касается чувствительного элемента деформометра. Ранее с помощью емкостного преобразователя измерялось изменение площади перекрытия пластин измерительной емкости датчика [1]. Предыдущий образец ДКЦ представлен на рис. 1.

При проявлении деформационных процессов в пластине подложки, актуальным для проведения измерительных процедур является не оценка изменений площади перекрытия измерительной емкости, а точное определение величины изменения зазора между неподвижными пластинами (2), установленными на плате (3) емкостными преобразователями и измерительным кронштейном (1) (рис. 2).

В конструкцию ДКЦ были внесены изменения. Устройство было разделено на две платы для



Рис. 1. Предыдущий образец ДКЦ [1].

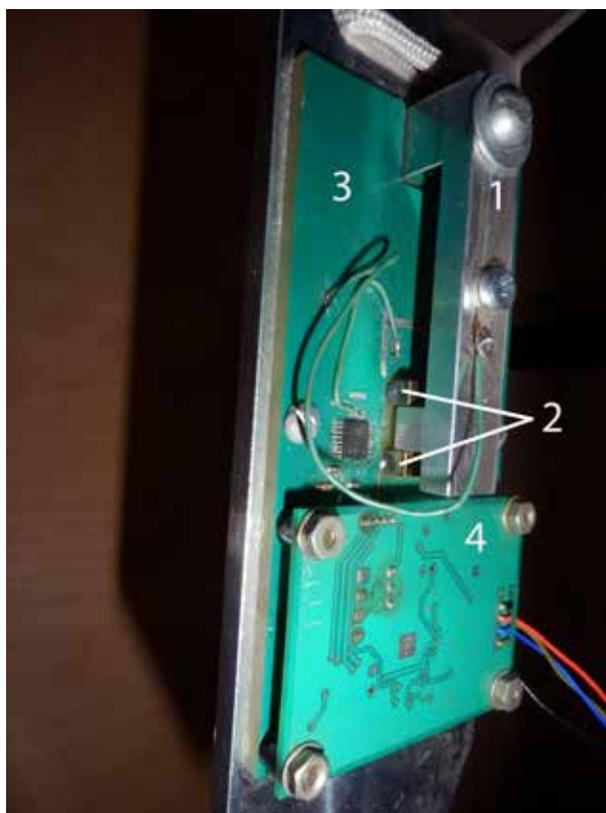


Рис. 2. Усовершенствованный вариант ДКЦ. 1 – Измерительный кронштейн, 2 – неподвижные пластины, 3 – плата емкостного преобразователя, 4 – плата контроллера.

минимизации паразитной емкости и исключения взаимного влияния на измерительную дифференциальную емкость. Такой подход позволяет получить более точные и надежные результаты измерений зазора между пластинами и измерительным кронштейном, что важно для эффективной работы прибора.

На первой плате (3, рис. 2) находятся неподвижные измерительные пластины, формирующие дифференциальную емкость, а также сама микросхема емкостного преобразователя. На второй плате (4, рис. 2) расположена цифровая часть. Плата (3) имеет выход на двухпроводной интерфейс I²C, который представляет собой последовательную асимметричную шину для связи между интегральными схемами внутри ДКЦ. По этому интерфейсу производится синхронный, полудуплексный обмен информацией от контроллера, расположенного на плате (4) и емкостным преобразователем, расположенным на плате (3).

Основная задача контроллера заключается в обработке данных, полученных от микросхемы емкостного преобразователя AD7745, а также в обмене информацией с внешними устройствами, например, с ноутбуком.

Применение микросхемы AD7745 емкостного преобразователя в электронной части ДКЦ позволило совместить высокую чувствительность и широкий динамический диапазон измерений при разных механических напряжениях. Она позволяет измерять изменение величины дифференциальной емкости и температуру с преобразованием в цифровой код, т.е. создавать электронные устройства с высокой точностью измерений и широкой областью применения.

Было изменено и крепление прибора в испытуемой конструкции: вместо постоянных магнитов, используемых в предыдущем варианте, было применено надежное винтовое соединение.

В новом варианте прибора производится измерения зазора между пластинами (2, рис. 2) и измерительным кронштейном (1, рис. 2), равному относительному изменению дифференциальной емкости, измеренному микросхемой AD7745. Это существенно облегчает построение прибора, поскольку крутизну преобразования определяет величина относительного изменения зазора (ξ) при смещении измерительного кронштейна на расстояние относительно неподвижных пластин при деформациях пластины подложки:

$$\xi = x/d, \quad (1)$$

где d – зазор между пластинами.

Была выбрана величина зазора между пластинами $d = 0.1$ мм, что позволило получить $\xi = 0.01$ при $x = 1$ мкм, тогда как в первом варианте устройства:

$$\xi = x/b,$$

где b – линейное перекрытие пластин, при $b = 2$ мм и $x = 1$ мкм, соответствующая величина $\xi = 0.0005$.

Одно из важных условий успешного проведения испытаний – уменьшение влияния таких паразитных эффектов, как элементы сухого трения при использовании неподвижного блока для натяжения пластины подложки. Эти эффекты могут вносить искажения в результаты испытаний, особенно при деформации пластины подложки. Поэтому для получения более точных результатов, необходимо учитывать их влияние и применять соответствующие методы уменьшения паразитных эффектов.

Для обеспечения большей чистоты экспериментов было принято решение отказаться от использования неподвижного блока [1]. Вместо этого, пластина вместе с деформометром была подвешена вертикально и растягивалась в вертикальном направлении при помощи грузов известной величины. Этот метод позволил уменьшить влияние паразитных эффектов на результаты эксперимента и получить более точные результаты.

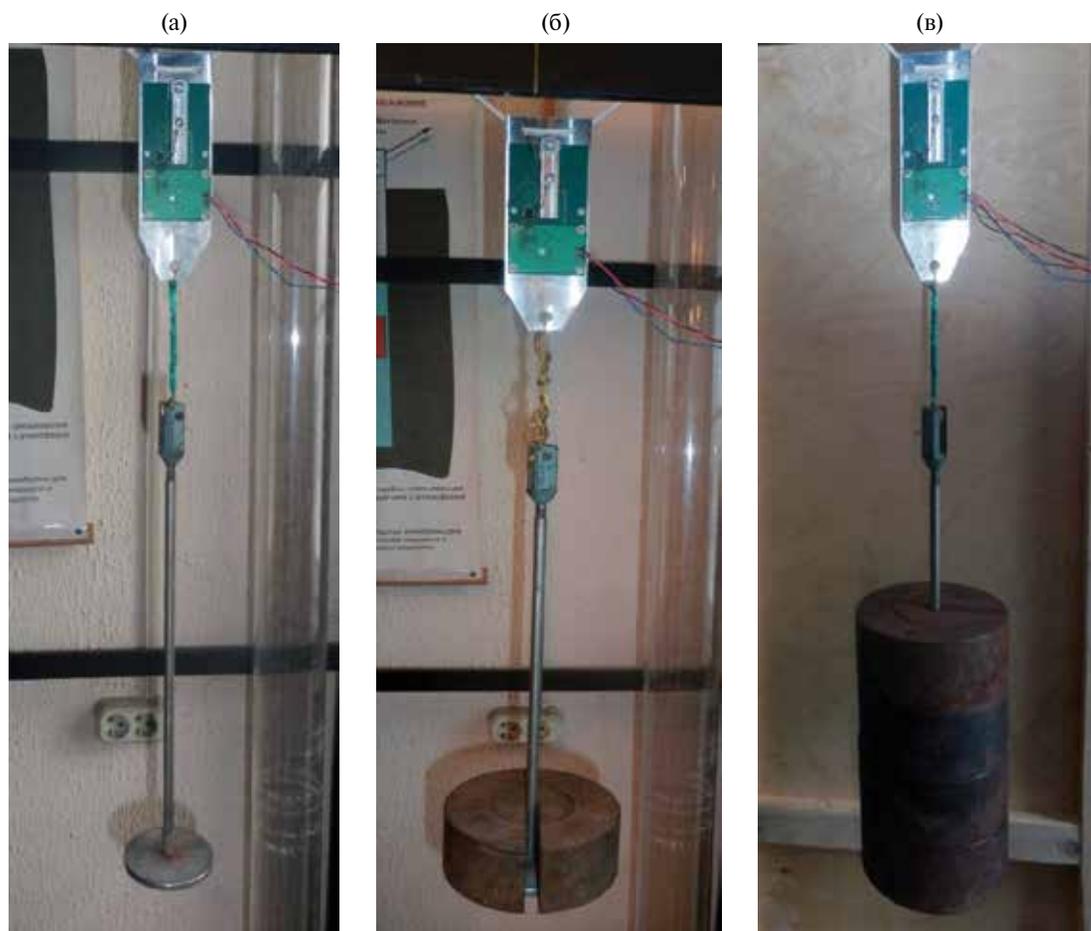


Рис. 3. Испытательный стенд ДКЦ Пластина: а – без нагрузки, б – с нагрузкой 4 кг, в – с нагрузкой 16 кг.

На рис. 3 представлены фотографии простой установки для измерения растягивания пластины. В центре установки находится пластина с установленным на ней деформометром, к которой прикреплен вертикальный стержень. На стержень последовательно нанизываются грузы с известной массой.

В основе испытаний деформометра лежали следующие ключевые условия:

1. *Установка:* деформометр должен быть правильно установлен и зафиксирован.

2. *Нагрузка:* на образец должна быть приложена известная нагрузка, которая может быть изменяемой во время испытания.

3. *Контроль условий:* важно обеспечить стабильные условия испытания, включая температуру, влажность, атмосферное давление и другие факторы, которые могут влиять на результаты эксперимента.

4. *Результаты:* информационные данные должны быть записаны на персональный компьютер с помощью специального программного обеспечения, разработанного сотрудниками ИГЭ РАН.

5. *Обработка данных:* после проведения испытаний необходимо правильно обработать полученные данные, провести анализ и интерпретацию результатов с использованием соответствующих методов и моделей.

Кроме того, для достижения более точных результатов может потребоваться повторить эксперимент несколько раз и вычислить средние значения. Это поможет уменьшить ошибку измерения и получить более надежные результаты.

Для проведения эксперимента на растяжение пластины подложки необходимо выполнить следующие действия:

1. Подготовить металлическую пластину подложки и закрепить деформометр на ней.

2. Надежно прикрепить стержень к пластине подложки и установить его в вертикальном положении.

3. Измерить начальное растяжение пластины подложки без груза (см. рис. 3а) и занести эту величину в таблицу результатов.

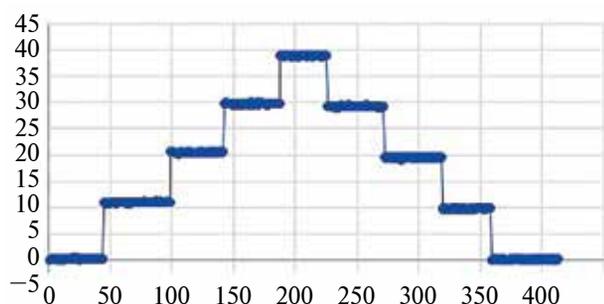


Рис. 4. График зависимости величины деформации пластины подложки от веса груза.

Ось абсцисс – число измерений за время проведения эксперимента, ось ординат – значения относительных изменений измеренной дифференциальной емкости по показаниям с микросхемы AD7745, т.е. значения деформаций пластины подложки в условных единицах АЦП при изменении нагрузки от 0 кг (без груза) до 16 кг с шагом 4 кг и обратно до 0 кг.

4. Прикрепить к пластине груз массой 4 кг (см. рис. 3б) и занести в таблицу показания деформометра.

5. Продолжать добавлять грузы массой по 4 кг (8, 12, 16 кг) и заносить соответствующие показания деформометра в таблицу.

6. После достижения максимальной нагрузки в 16 кг (см. рис. 3в) постепенно убирать грузы по 4 кг и заносить показания деформометра в таблицу.

7. По окончании эксперимента измерить растяжение пластины без груза и занести эту величину в таблицу результатов.

Общая продолжительность испытаний – 4 часа. Одновременно при испытаниях необходимо измерять температуру в помещении вблизи установки.

На основании этого эксперимента строится график (рис. 4), отображающий зависимость величины деформацией пластины подложки по показаниям емкостного преобразователя AD7745 от веса груза во времени.

Графики изменения средних значений температуры (ряд 1) и деформаций пластины подложки (ряд 2) во время проведения испытаний представлены на рис. 5.

Исходя из проведенного анализа данных и графика (см. рис. 5), можно сделать следующий вывод, что величина растяжения подложки увеличивается пропорционально весу груза, и несложно рассчитать изменение деформаций пластины подложки при изменении нагрузки на 4 кг.

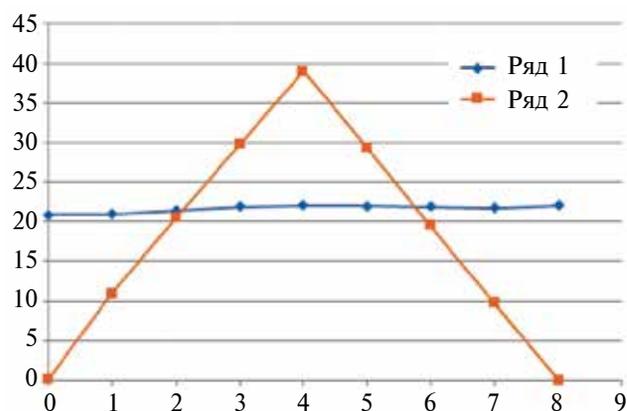


Рис. 5. Графики изменения средних значений температуры (ряд 1) и деформаций пластины (ряд 2) во времени. Ось абсцисс – ступени нагружения/разгрузки.

Значение деформации в каждой точке будем обозначать символом D_n , где n – номер измерения от 0 до 8, эти данные представлены в табл. 1.

Среднее значение изменения деформации $D_n - D_{(n-1)}$ от точки до точки на одинаковое изменение нагрузки равно 9.6335 условных единиц, среднеквадратическое отклонение $\sigma = 0.5482$. Существует вероятность, что симметричные по нагрузке точки деформации различаются по величине из-за воздействия изменений температуры, так как при повышении или понижении температуры материалы сжимаются или расширяются. В результате эти точки теряют свою симметрию и различаются по величине растяжений.

Для учета влияния изменений температуры введем символ D_n^* деформации в точке n . Новое значение D_n^* деформации в точке n будем определять из выражения:

$$D_n^* = D_n - k\Delta T/D_n,$$

где коэффициент k находится из условия равенства значений растяжений в симметричных по нагрузкам точкам, ΔT – разность температур T_n и T_0 .

Произведем расчет k , например, при условии $D_1^* = D_7^*$:

$$D_1^* = D_1 - k(T_1 - T_0)/D_1 = D_7^* = D_7 - k(T_7 - T_0)/D_7.$$

Подставляя значения из табл. 1, получаем $k = -13.8341$ и $D_1^* = D_7^* = 11.0171$.

Величины деформаций D_n^* после данной обработки и изменение деформации $Dn^* - D_{(n-1)}^*$, как отклик на изменение нагрузки на 4 кг с учетом вариации температуры, приведены в табл. 2. Среднее значение отклика от точки до точки на одинаковое изменение нагрузки равно 9.2143 условных единиц ($\sigma = 0.487$).

Таблица 1. Изменение деформации пластины подложки по данным с емкостного преобразователя при изменении нагрузки на пластину

Точка D_n	Значение в точке D_n	Отклик от точки до точки $D_n - D_{(n-1)}$	Нагрузка в точке D_n , кг	Температура в точке D_n , °C
0	0.1831		0	20.9097
1	10.9352	10.7521	4	20.9745
2	20.4757	9.5405	8	21.4434
3	29.8084	9.3327	12	21.9199
4	38.6601	8.8517	16	22.0890
5	29.3309	9.3292	12	21.9807
6	19.5185	9.8124	8	21.8953
7	9.7759	9.7426	4	21.7872
8	0.0695	9.7064	0	22.0544

Таблица 2. Изменение деформации пластины подложки, как отклик на изменение нагрузки с учетом вариации температуры

Точка D_n	Значение в точке D_n	Коэффициент k	Значение в точке D_n^*	Отклик от точки до точки $D_n^* - D_{(n-1)^*}$
0	0.1831			
1	10.9352	-13.8341	11.0171	
2	20.4757	-13.8341	20.8386	9.8215
3	29.8084	-13.8341	30.2770	9.4384
4	38.6601		38.6601	8.3831
5	29.3309	-13.8341	29.8358	-8.8243
6	19.5185	-13.8341	20.2171	-9.6187
7	9.7759	-13.8341	11.0171	-9.2000
8	0.0695			

График изменения средних значений деформаций пластины подложки с учетом вариаций температуры представлен на рис. 6. На этом графике значения растяжений пластины в симметричных по нагрузкам точках стали ближе по сравнению с данными, приведенными на рис. 5.

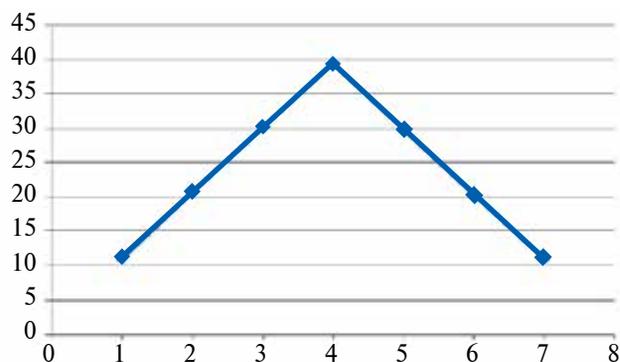
Деформация участка пластины подложки длины L при ее нагружении массой m составит величину:

$$\eta = x/L = mg/SE,$$

где g – ускорение свободного падения, S – площадь сечения растягиваемой пластины (2.5 см^2), E – модуль Юнга материала пластины (в эксперименте была использована пластина из дюраля с $E = 7.3 \times 10^{11} \text{ Н/см}^2$).

Результат вычислений показал, что при нагрузке пластины массой $m = 4 \text{ кг}$ величина η

составляет 2.1479×10^{-6} . Это соответствует смещению измерительного кронштейна на величину $x = 1.1 \times 10^{-5} \text{ см}$.

**Рис. 6.** График изменения средних значений деформаций пластины подложки с учетом вариаций температуры.

Среднее значение отклика на увеличение или уменьшение нагрузки на 4 кг составляет 9.2143 условных единиц ($\sigma = 0.487$). Это означает (см. (1)), что минимально обнаруживаемые деформации пластины в данном варианте прибора составят $\sim 10^{-7}$, что соответствует смещениям $x = 2 \times 10^{-7}$ см или 20 Å.

Одним из ключевых изменений в конструкции ДКЦ стало использование нового принципа измерения: вместо вариации площади перекрытия пластин измерительных емкостей, в емкостном преобразователе теперь измеряется изменение зазора между пластинами. Это изменение значительно повлияло на характеристики датчика, особенно на его крутизну преобразования.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о том, что измерение деформации пластин при их нагружении может быть эффективным методом контроля в различных областях, связанных с механикой материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрено созданное устройство деформометр короткобазисный цифровой (ДКЦ), позволяющий эффективно решать задачи, связанные с определением состояния трубопроводов

различного назначения. Кроме того, данное устройство может быть применено для мониторинга состояния металлоконструкций и обеспечения безопасности при критических нагрузках, вызывающих деформации.

Результаты исследования показали, что ДКЦ обладает высокой точностью и надежностью при проведении мониторинга, что делает его полезным инструментом для решения вышеупомянутых задач. Данное устройство может быть использовано в различных областях, связанных с мониторингом и контролем технических систем, где необходима высокая точность и надежность при проведении измерений.

В дополнение к этому было установлено, что новый датчик, выполненный на микросхеме AD7745 емкостного преобразователя, обладает более высокой надежностью и долговечностью по сравнению с предыдущей версией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Манукин А.Б., Гинзбург А.А., Савосин В.В., Гинзбург М.А. Короткобазисный высокочувствительный цифровой деформометр для измерения деформаций на трубопроводах и элементах инженерных сооружений // Геоэкология. 2022. № 1. С. 77–84.

TEST RESULTS OF AN IMPROVED SHORT-BASELINE DIGITAL DEFORMOMETER USING A NEW BENCH DESIGN

A. B. Manukin^{a,b}, V. V. Timkov^a, V. V. Savosin^a, M. A. Ginzburg^{a,#}

^a*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

^b*Institute of Earth Physics, Russian Academy of Sciences, ul. B. Gruzinskaya, 10, Moscow, 123242 Russia*

[#]*E-mail: gimaal@yandex.ru*

The article presents the results on laboratory tests of a short-baseline digital deformometer (SDC), developed to study deformation processes on pipelines and units of engineering structures, with the changes made to its design and electronic part, as well as the results of testing a new design of the test bench. The presented results show the effectiveness and accuracy of the new testing methodology, which makes it possible to increase the reliability of the results obtained.

Keywords: *digital strainmeter, dynamic range, sensitivity, conversion steepness, test bench*

REFERENCES

1. Manukin, A.B., Ginzburg, A.A., Savosin, V.V., Ginzburg, M.A. [Short-base high-sensitivity digital deformometer for measuring deformations on pipelines and units of engineering structures]. *Geoekologiya*, 2022, no. 1, pp. 77–84. (in Russian)