

~~ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ~~
~~ТЕХНИКА~~

УДК 681.586.5:621.3.049.77

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ СТЕНДА ДЛЯ
КАЛИБРОВКИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ
ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ОПОР НАДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕРРОГАТОРА НА ОСНОВЕ ФОТОННОЙ
ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ¹**

©2026 г. Е. Е. Ковалев ^{a, b, *}, И. А. Казаков ^{a, b}, К. М. Малахов ^{a, b},

А. С. Тутунин ^a, А. В. Шипулин ^a

^aСколковский институт науки и технологий

Россия, 121205, Москва, Большой бульвар, 30, стр. 1

^bООО “Файбер Пайп”

Россия, 121205, Москва

*E-mail: egor.kovalev@skoltech.ru

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 11.05.2026

Принята к публикации 18.06.2026

Представлены результаты разработки и экспериментальной верификации стенда для калибровки волоконно-оптических датчиков перемещений. Стенд реализует консольную балочную схему нагружения с управляемым перемещением свободного конца и обеспечивает воспроизведение изгибных деформаций трубопровода с масштабным коэффициентом порядка 0.08. В качестве измерительной системы использованы датчики на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР), опрашиваемые интеррогатором на основе дифракционной волноводной решетки (ДВР). Точность определения длины волны ВБР разработанной сенсорной системой составила 10 пм. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие работоспособность стенда и возможность его применения для калибровки волоконно-оптических сенсорных систем. Экспериментально достигнута точность определения перемещений опор до 0.1 мм в диапазоне перемещений до 10 мм. Разработанный стенд может быть использован для калибровки и исследования волоконно-оптических датчиков перемещений, предназначенных для систем мониторинга состояния трубопроводов.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик перемещений, волоконная брэгговская решетка, ВБР, калибровочный стенд, интеррогатор, дифракционная волноводная решетка, изгибные деформации, мониторинг трубопроводов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Надежная эксплуатация надземных трубопроводов, особенно в условиях сложных климатических и геологических воздействий, требует постоянного мониторинга их

¹ Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2026”, Россия, Пермь, 26–28 мая 2026 г.

напряженно-деформированного состояния [1]. Одним из ключевых факторов, влияющих на целостность конструкции, является перемещение опор, приводящее к возникновению изгибных деформаций и перераспределению внутренних напряжений в трубопроводе [2].

Для измерения деформаций широко применяются волоконно-оптические технологии сенсорики [3], в частности, чувствительные элементы на основе ВБР. Эти датчики обладают высокой чувствительностью, устойчивостью к электромагнитным помехам и возможностью эксплуатации в сложных условиях [4]. Регистрация сигналов, приходящих с волоконно-оптических датчиков, осуществляется с помощью интеррогаторов – специальных устройств опроса, измеряющих сдвиг длины волны отраженного от чувствительного элемента сигнала.

В предыдущих работах [4–6] был разработан и экспериментально апробирован интеррогатор на основе фотонной интегральной схемы (ФИС), обеспечивающий точность регистрации спектральных изменений в 5 пм [5]. Однако для калибровки датчиков и верификации измерительной системы необходимы контролируемые условия нагружения, воспроизводящие деформационное состояние реального трубопровода.

В связи с этим в настоящей работе разработан экспериментальный стенд, моделирующий изгибные деформации трубопровода при перемещении опор. Конструкция стенда обеспечивает механическое подобие по линейным деформациям и линейную зависимость деформации от перемещения опоры, что позволяет выполнить апробацию волоконной технологии и провести калибровочные испытания.

Целью работы является разработка и экспериментальная верификация стенда для калибровки волоконно-оптических датчиков, а также апробация алгоритма обработки сигналов интеррогатора на основе ДВР для определения длины волны отражения ВБР.

2. ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ

На рис. 1 представлена схема интеррогатора на ФИС, включающая широкополосный источник излучения ASE, циркулятор, волоконные брэгговские решетки и фотодиоды. Сигнал с фотодиодов поступает на систему обработки сигналов, которая выполняет оцифровку сигнала и вычисления поступающей длины волны ВБР-датчика.

Рис. 1. Схема интеррогатора на ДВР: ASE – широкополосный источник света, ВБР – волоконная брэгговская решетка, ДВР – дифракционная волноводная решетка, ФД – фотодиод

Излучение от источника отражается от ВБР-датчиков на их центральной длине волны. Она, в свою очередь зависит от внешнего воздействия; волна поступает на вход ДВР, где происходит ее спектральное разложение по каналам.

В каждом канале ДВР регистрируется оптическая мощность, величина которой определяется положением максимума спектра отражения ВБР относительно спектров пропускания каналов. Таким образом, длина волны отражения ВБР может быть восстановлена по распределению мощностей на выходах фотоприемников.

Аналитическое описание данного процесса подробно приведено в работе [4]. В рамках используемого приближения мощность в i -м канале определяется выражением

$$P_i = T_{ch,i}(\lambda_{FBG}),$$

где $T_{ch,i}(\lambda)$ - спектральная функция пропускания i -го канала ДВР.

В данной работе для определения длины волны используется метод средневзвешенной оценки по четырем соседним каналам ДВР с коррекцией с помощью градуировочной таблицы:

$$\lambda_{FBG} = \frac{\sum_{i=n-1}^{n+2} \lambda_{ch,i} P_i}{\sum_{i=n-1}^{n+2} P_i},$$

где $\lambda_{ch,i}$ - центральные длины волн каналов, P_i - измеренные мощности.

Использование нескольких каналов позволяет повысить устойчивость алгоритма к шумам измерения и флуктуациям мощности источника. В данной работе использовалось 4 канала для одного ВБР-датчика.

3. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

3.1. Интеррогатор и его калибровка

Испытания проводились с использованием прототипа интеррогатора на ДВР на ФИС. Сигналы с выходных каналов ДВР регистрировались при отражении излучения от датчика ВБР.

Частота опроса составляла 1 Гц с возможностью увеличения до 100 Гц. Для снижения влияния шумов измеренные значения усреднялись по 100 отсчетам. Стоит отметить, что данная архитектура интеррогатора позволяет достигнуть и более высоких скоростей опроса, например, до 2кГц [7].

Определение длины волны отражения ВБР осуществлялось по распределению оптической мощности между каналами ДВР с использованием алгоритма средневзвешенной оценки с градуировочной таблицей.

Для обеспечения метрологической точности измерений проводилась градуировка интеррогатора с использованием опорного оптического спектрометра. Схема эксперимента приведена на рис. 2.

Рис. 2. Блок-схема проводимого эксперимента

Отраженное от ВБР излучение делилось с помощью оптического ответвителя: одна часть направлялась в интеррогатор, другая - на оптический спектроанализатор, обеспечивающий эталонное измерение длины волны. В процессе градуировки осуществлялось сканирование длины волны отражения ВБР, при этом для каждого значения регистрировались сигналы каналов ДВР и соответствующее значение длины волны.

Экспериментально достигнутая среднеквадратическая погрешность определения длины волны составила порядка 18 пм. Анализ распределения ошибок показал отсутствие систематической составляющей и концентрацию значений в диапазоне ± 10 пм.

Полученная точность обеспечивает возможность измерения перемещений порядка 0.1 мм в диапазоне до 10 мм при соответствующей конфигурации датчика и механической системы.

3.2. Экспериментальный стенд

Стендовые испытания проводились с использованием разработанной экспериментальной установки, реализующей консольную балочную схему нагружения с перемещением свободного конца. Модель установки общего вида показана на рис. 3, а ее реальный вид с местами крепления датчика и штангенциркуля – на рис. 4.

Рис. 3. Модель экспериментальной установки для тестирования датчиков. На схеме красным выделено место крепления датчика, зеленым – место установки штангенциркуля для контроля перемещений

Стенд выполнен на основе трубы ВГП диаметром 75.5 мм с толщиной стенки 4 мм (ГОСТ 3262-75, сталь Ст3пс) и длиной пролета 1815 мм. Несущая рама стенда — разборная ферма из квадратной профильной трубы 40×40×2 мм³ (ГОСТ 8639-82, сталь Ст3пс), состоящая из трех секций, соединяемых болтовыми соединениями М8. Один конец трубы жестко защемлен в заделке; нагружение свободного конца осуществляется винтовым домкратом, обеспечивающим контролируемое вертикальное перемещение опоры (рис. 4).

Рис. 4. Установка для тестирования датчиков. На схеме красным выделено место крепления датчика, зеленым – место установки штангенциркуля для контроля перемещений

Волоконно-оптический датчик на основе ВБР установлен на расстоянии 60 мм от заделки и закреплен на поверхности трубы с помощью цианакрилатного клеевого соединения, что обеспечивает передачу осевых деформаций трубы непосредственно на чувствительный элемент датчика

Стенд предназначен для моделирования изгибных деформаций надземного трубопровода при перемещении опор. В отличие от натурального объекта, имеющего многопролетную схему, стенд воспроизводит эквивалентное напряженно-деформированное состояние с точки зрения линейных деформаций, регистрируемых волоконно-оптическими датчиками.

Критерием подобия являлось совпадение характера зависимости линейной деформации от перемещения опоры $\varepsilon(\delta)$, а количественной мерой подобия - отношение производных $\alpha = d\varepsilon/dh$ для стенда и натурального объекта. Для натурального трубопровода ($D = 530$ мм, $S = 12$ мм, пролет $L = 10$ м) значение производной в сечении на расстоянии 200 мм от заделки составляет $\alpha_{\text{large}} = 3938.5$ (мкм/м)/м. Оптимальная конфигурация стенда была определена полным перебором примерно 141 000 комбинаций геометрических параметров (диаметр трубы D , толщина стенки S , длина пролета L , положение датчика X) со следующими критериями: линейность $\varepsilon(\delta)$ и $\alpha_{\text{mini}}/\alpha_{\text{large}} \leq 0.1$. По результатам поиска выбрана конфигурация $D = 75.5$ мм, $S = 4$ мм, $L = 1815$ мм, $X = 1762$ мм (от заделки).

Для выбранной конфигурации расчетное значение коэффициента масштабирования составляет $\alpha_{\text{mini}}/\alpha_{\text{large}} = 0.076$. Погрешность этого коэффициента обусловлена двумя источниками: (1) дискретностью сетки параметрического поиска (шаг по L — 50 мм, по X — 1% от L), дающей относительную неопределенность не более 3%; (2) отклонением фактического положения датчика от расчетного $X = 1762$ мм в пределах ± 5 мм, что при линейной зависимости $\varepsilon(X)$ в зоне установки вносит дополнительную погрешность около 0.3%. Суммарная относительная погрешность коэффициента масштабирования не превышает 3.3%, то есть 0.076 ± 0.003 , что не влияет на выполнение основного требования $\alpha_{\text{mini}}/\alpha_{\text{large}} \leq 0.1$.

3.3. Методика проведения эксперимента

В ходе испытаний волоконно-оптический датчик с ВБР закреплялся на поверхности трубы вблизи заделки с использованием клеевого соединения. Перемещение опоры задавалось с помощью винтового механизма, обеспечивающего контролируемое изменение положения. Процесс перемещения представлен на рис. 5.

Рис. 5. Смещение опорной конструкции. Этап подъема трубы на расчетную высоту с использованием винтового домкрата для создания управляемого перемещения опоры

Измерение перемещения осуществлялось с использованием штангенциркуля с внешним питанием от стабилизированного источника. Перед проведением измерений выполнялись предварительная настройка системы и проверка воспроизводимости

результатов. В ходе эксперимента перемещение опоры задавалось в несколько циклов, при этом регистрировались значения длины волны и соответствующие им перемещения.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Точность определения длины волны

На рис. 6 представлены результаты оценки точности алгоритма определения длины волны по откликам каналов AWG.

Рис. 6. Распределение ошибок определения длины волны при испытаниях устройства

Слева приведен график рассеяния ошибок, демонстрирующий их распределение относительно нулевого значения. Отсутствие выраженного смещения указывает на отсутствие систематической погрешности. Разброс значений составляет от -20 до $+40$ пм.

Справа представлена гистограмма распределения ошибок. Основная масса значений сосредоточена в диапазоне ± 10 пм, что свидетельствует о высокой точности метода. Распределение характеризуется слабой асимметрией и отсутствием значительных выбросов.

В результате применения аналитического алгоритма обработки сигналов (аппроксимация четырехпараметрической сигмоидой) была достигнута среднеквадратическая погрешность определения длины волны порядка 18 пм. При этом точность сохранялась по всему рабочему диапазону, а алгоритм продемонстрировал устойчивость к шумам и не требовал дополнительной параметрической настройки.

Также хотелось бы отдельно отметить, что в предыдущей работе [4] был предложен метод определения длины волны, основанный на построении калибровочной функции с использованием отношения сигналов соседних каналов. Применение методов машинного обучения для обработки сигналов измерительной системы [5] также позволяет повысить точность детектирования в несколько раз.

Таким образом, полученные результаты показывают, что выбранный метод обработки обеспечивает компромисс между вычислительной сложностью и точностью, что делает его пригодным для реализации на встроенных вычислительных устройствах.

4.2. Параметры разработанного устройства

В ходе испытаний были достигнуты основные целевые характеристики устройства. Следует отметить, что анализ сценариев эксплуатации показал избыточность высокой частоты опроса (порядка кГц) для задачи мониторинга смещений опор трубопроводов. Практически значимые изменения происходят на существенно меньших временных

масштабах, что позволяет снизить требования к каналам передачи данных и всей системы в целом.

Основные параметры устройства приведены в табл. 1.

Таблица 1. Сопоставление достигнутых параметров устройства

Параметр	Значение
Спектральное разрешение	Приблизительно 18 пм
Частота опроса	до 100 Гц
Количество датчиков	4
Диапазон смещений	15 мм
Точность измерения	0.6 мкм
Энергопотребление	до 10 Вт
Габариты	275×216×142 мм ³

4.3. Результаты стендовых испытаний

Экспериментальная зависимость длины волны от смещения опоры приведена на рис. 7.

Рис. 7. Экспериментальные данные, зависимость длины волны от смещения опоры

Полученные данные демонстрируют линейный характер зависимости, что подтверждает корректность выбора как измерительного метода, так и параметров стендовой установки.

На рис. 8 представлена зависимость ошибки определения смещения от предсказанного значения.

Рис. 8. Зависимость ошибки определения смещения от предсказанного значения

Анализ показывает отсутствие выраженной систематической составляющей ошибки и равномерное распределение погрешности по диапазону измерений.

Среднеквадратическая ошибка определения смещения на стенде составила 1.12 мм. С учетом коэффициента масштабирования 0.076, соответствующего переходу к натурному объекту, получаем

$$RMSE_{real} = 1.12 \cdot 0.076 = 0.085$$

Таким образом, точность измерения смещения на натурном объекте составляет порядка 85 мкм.

Диапазон измерений также был оценен с учетом масштабирования. При спектральном диапазоне 2.4 нм и чувствительности порядка 130 мм/нм диапазон смещений на стенде составляет 312 мм, что соответствует 23.7 мм для натурного объекта.

5. ВЫВОДЫ

В работе разработан и экспериментально верифицирован интеррогатор на основе фотонной интегральной схемы с AWG для измерения смещений опор трубопроводов с использованием волоконно-оптических датчиков.

Показано, что предложенный алгоритм обработки сигналов, основанный на аналитической аппроксимации откликов каналов, обеспечивает точность определения длины волны на уровне около 18 пм при высокой устойчивости к шумам и низкой вычислительной сложности.

Экспериментальные исследования на стендовой установке подтвердили возможность измерения смещений с точностью порядка 85 мкм при диапазоне измерений более 20 мм (в пересчете на натурный объект).

Дополнительно установлено, что для рассматриваемого класса задач высокая частота опроса датчиков является избыточной, что открывает возможности для оптимизации энергопотребления и архитектуры системы.

Полученные результаты демонстрируют перспективность применения разработанного интеррогатора в системах мониторинга технического состояния трубопроводов и создают основу для дальнейшей интеграции в полевые измерительные комплексы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кантемиров И.Ф., Быков Л.И., Бешерян З.А., Соколова В.В. Нефтегазовое дело. 2020. № 2. С. 80–90. <https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2020-2-80-90>.
2. Zhang J., Liang Z., Han C. Journal of Pressure Vessel Technology. 2016. Vol. 138. № 5. P. 051702. <https://doi.org/10.1115/1.4032991>.
3. Gizatulin A.R., Davletgareev I.A., Faskhutdinova Z.A., Sinitsin D.A., Salikhov A.I. Optical Technologies for Telecommunications 2024: Proc. SPIE. 2025. V. 13738. P. 137380B. <https://doi.org/10.1117/12.3067280>.
4. Казаков И.А., Малахов К.М., Ковалев Е.Е., Мкртчян А.А., Мишевский М.С., Светиков В.В., Шипулин А.В. Фотоника. 2024. Т. 18. № 2. С. 122. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2024.18.2.122.135.5>.
5. Kazakov I.A., Kulichenko I.V., Kovalev E.E., Treskova A.A., Barma D.D., Malakhov K.M., Shipulin A.V. IEEE Sensors Letters. 2025. <https://doi.org/10.1109/LSSENS.2025.11072673>.
6. Malakhov K., Popova I., Meleshko T., Kovalev E., Kazakov I., Ris D., Glushak D., Kolesnikov P., Stebel'kov A., Rezaeva A., Levin D., Ozherelev S., Dong Y., Shipulin A.

Chinese Optics Letters. 2026. V. 24, № 3. P. 030011.
<https://doi.org/10.3788/COL202624.030011>

7. *Gaskov M., Simonov V., Terentyev V., Lobach I.* Proceedings of the 2025 IEEE 26th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). 2025. <https://doi.org/10.1109/EDM65517.2025.11096884>.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Схема интеррогатора на ДВР: ASE – широкополосный источник света, ВБР – волоконная брэгговская решетка, ДВР – дифракционная волноводная решетка, ФД – фотодиод
- Рис. 2.** Блок-схема проводимого эксперимента
- Рис. 3.** Модель экспериментальной установки для тестирования датчиков. На схеме красным выделено место крепления датчика, зеленым – место установки штангенциркуля для контроля перемещений
- Рис. 4.** Установка для тестирования датчиков. На схеме красным выделено место крепления датчика, зеленым – место установки штангенциркуля для контроля перемещений
- Рис. 5.** Смещение опорной конструкции. Этап подъема трубы на расчетную высоту с использованием винтового домкрата для создания управляемого перемещения опоры
- Рис. 6.** Распределение ошибок определения длины волны при испытаниях устройства
- Рис. 7.** Экспериментальные данные, зависимость длины волны от смещения опоры
- Рис. 8.** Зависимость ошибки определения смещения от предсказанного значения

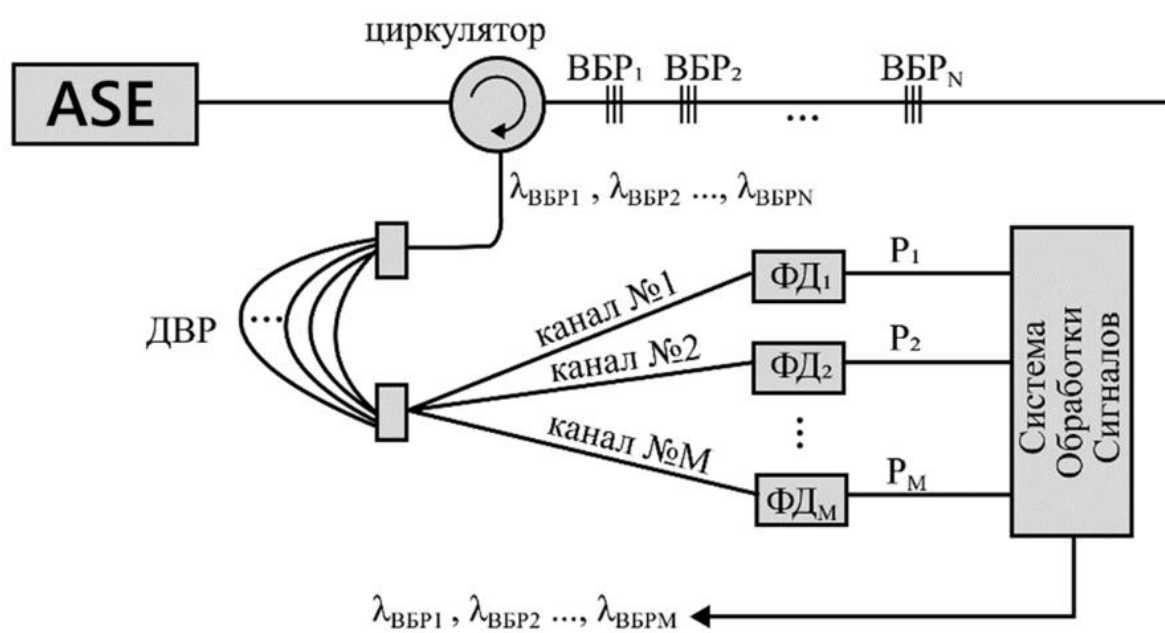


Рис. 1.

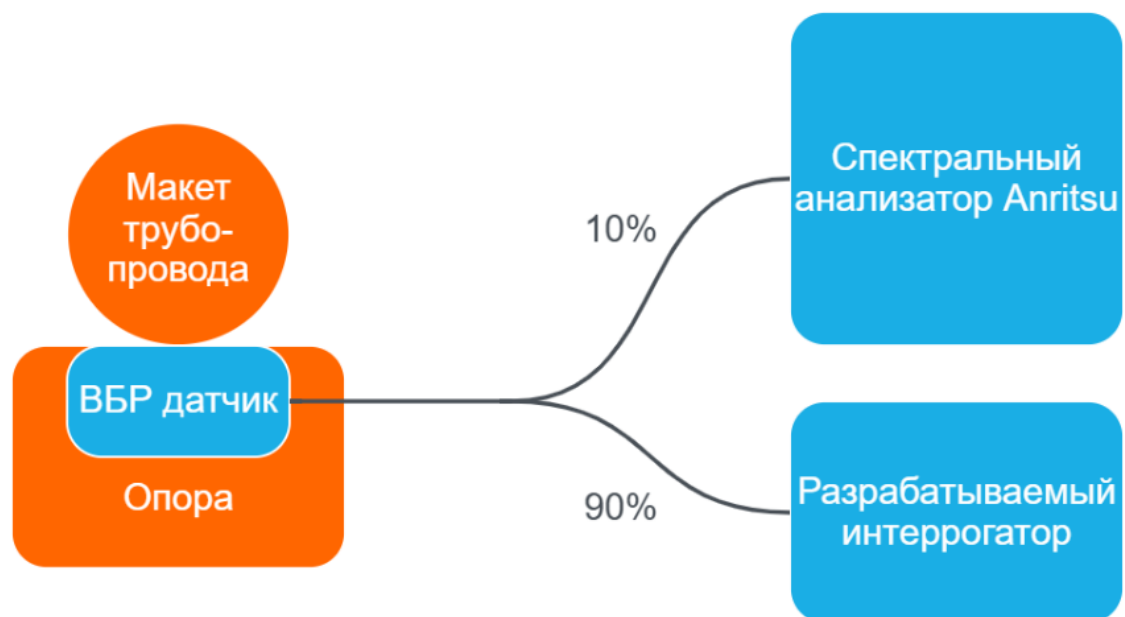


Рис. 2.

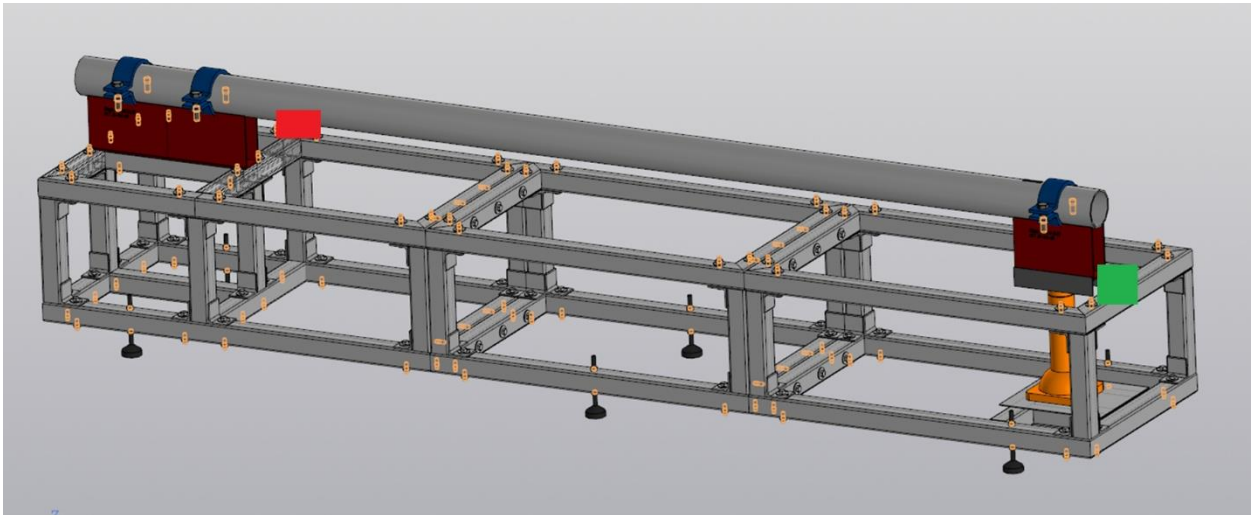


Рис. 3.

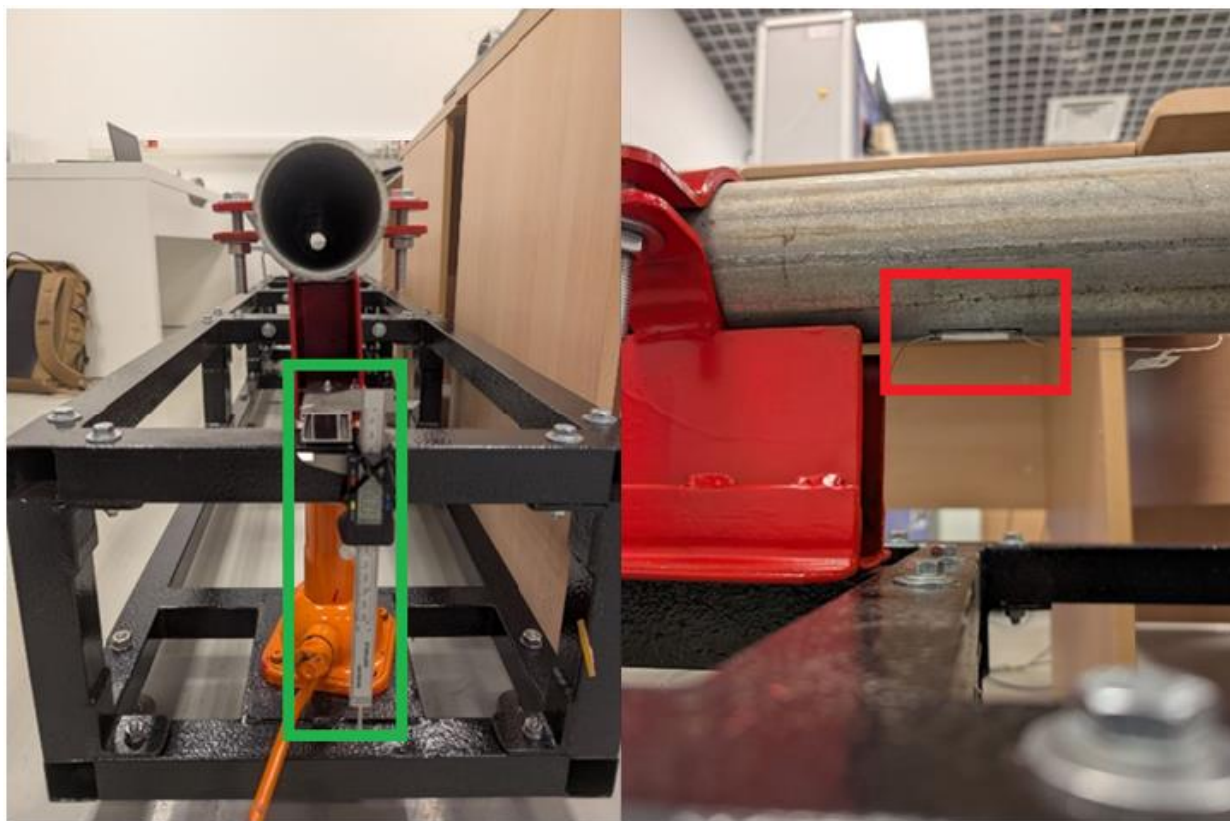


Рис. 4.

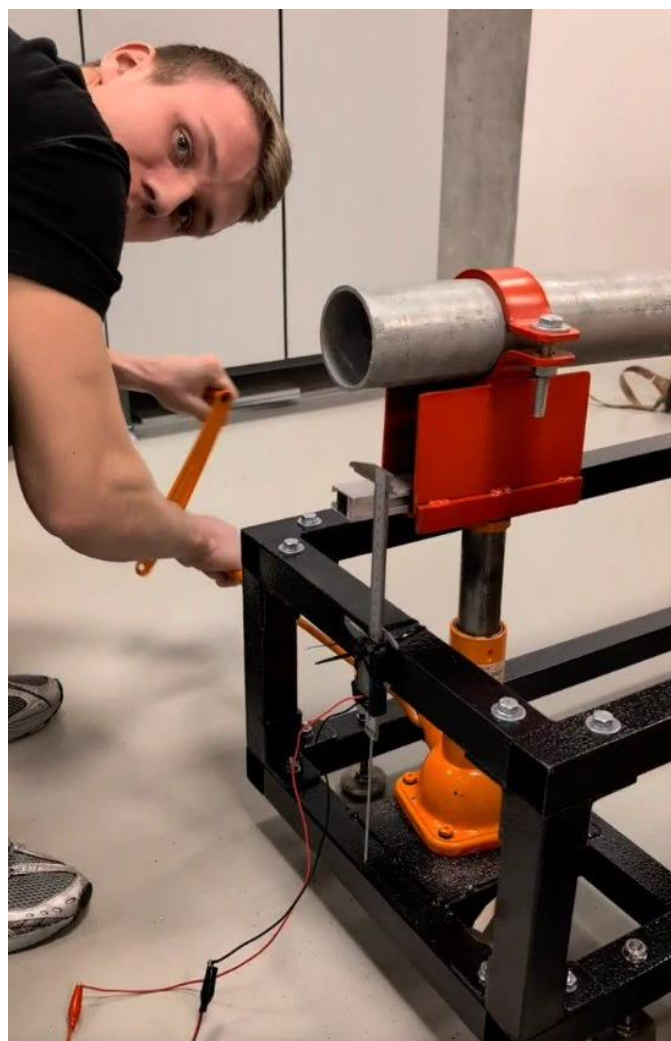


Рис. 5.

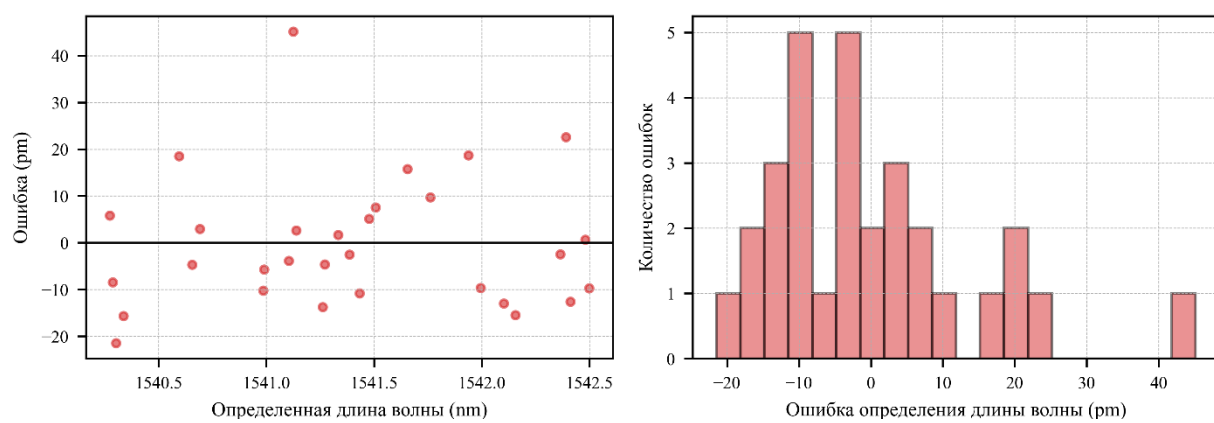
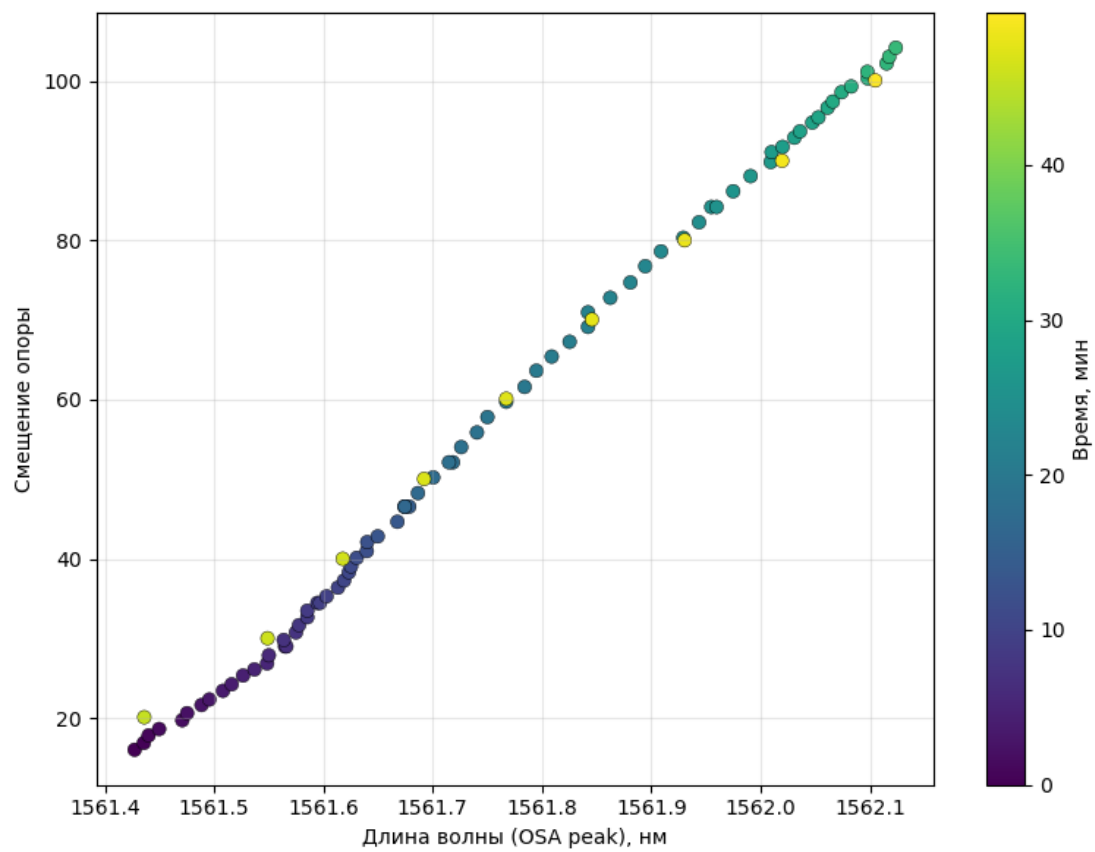


Рис. 6.



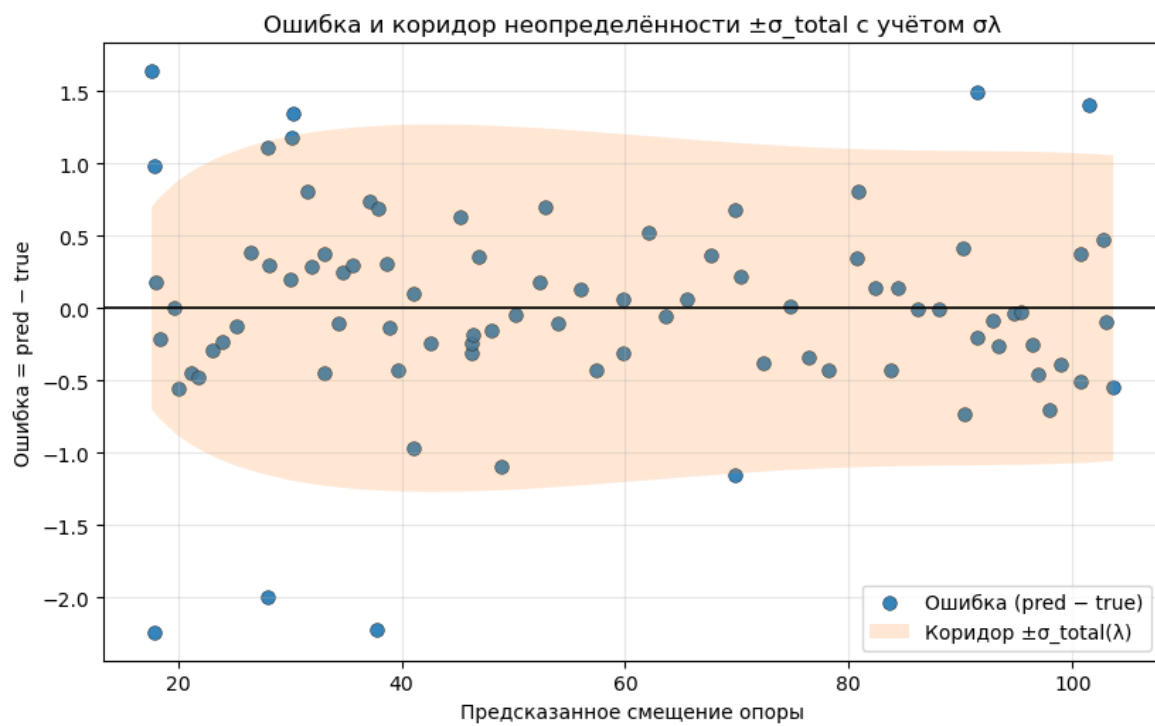


Рис. 8.