

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 621.384.62

**ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ КОНВЕКТИВНЫЙ ИНКЛИНОМЕТР НА
ОСНОВЕ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК: ЧИСЛЕННОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЭКСПЕРИМЕНТ И АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК¹**

© 2026 г. М. А. Давыдов^{a,b,*}, А. С. Сидоров^{a,c}, Ю. В. Филатов^b,
К. А. Сафарян^d, А. Н. Кондрашов^a

^aООО “Инверсия-Сенсор”

Россия, 614007, Пермь, ул. 25 Октября, 106

^bСанкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ”

Россия, 197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5Ф

^cПермский государственный национальный исследовательский университет

Россия, 614068, Пермь, ул. Букирева, 15

^dСанкт-Петербургский национальный исследовательский университет

информационных технологий, механики и оптики (ИТМО)

Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49А

*E-mail: davydov@i-sensor.ru

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 03.06.2026

Принята к публикации 16.07.2026

Рассматривается волоконно-оптический инклинометр, в котором угол наклона определяется по искажению температурного поля в герметичной газонаполненной полости. Дифференциальный тепловой отклик регистрируется парой волоконных брэгговских решеток, расположенных симметрично относительно линейного нагревателя. Построена трехмерная стационарная модель сопряженной задачи естественной конвекции и теплопередачи в воздушной кубической полости. Выполнена параметрическая оптимизация геометрии чувствительного элемента по критериям максимума чувствительности и линейности отклика. По результатам расчета изготовлен и испытан прототип с алюминиевым корпусом размерами $16 \times 16 \times 16$ мм³ и воздушной полостью размерами $10 \times 10 \times 10$ мм³. Экспериментальная зависимость дифференциального сдвига длины волны $\Delta\lambda(\alpha)$ монотонна в диапазоне 0–90°. Линейная аппроксимация до 65° дает чувствительность 6.6 пм/°, что при спектральном разрешении анализатора сигналов волоконно-оптических датчиков 1 пм соответствует оценке углового разрешения 0.15°. Показано, что предложенная конструкция применима для широкодиапазонного квазистатического мониторинга наклона.

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

Ключевые слова: конвективный датчик угла наклона; инклинометр волоконно-оптический; волоконная брэгговская решетка, параметрическая оптимизация.

1. ВВЕДЕНИЕ

Системы контроля наклона применяются в геотехническом мониторинге, наблюдении за инженерными сооружениями, трубопроводами, буровыми и энергетическими объектами. Практическая постановка задачи определяется компромиссом между диапазоном измерения, разрешением, устойчивостью к внешним воздействиям и возможностью удаленного считывания. Прецизионные пузырьковые уровни и узкодиапазонные электролитические датчики ориентированы на измерение малых отклонений около опорного положения, тогда как промышленные MEMS-инклинометры перекрывают диапазоны порядка $\pm 90^\circ$ и более [1–3].

Волоконно-оптические датчики занимают отдельный класс, поскольку они допускают удаленное считывание, мультиплексирование, электромагнитную совместимость и работу в условиях, где использование электроники в точке измерения нежелательно или недопустимо [4, 5]. Для задач мониторинга наклона это особенно существенно в распределенных системах контроля и на объектах с протяженными линиями связи [4, 6].

Развитие волоконно-оптических инклинометров в основном связано с механическим преобразованием угла в деформацию или смещение. Известны температурно-независимый датчик на основе преднапряженной волоконной брэгговской решеткой (ВБР) [7], двухкоординатный маятниковый инклинометр с двумя ВБР [8], а также применения волоконно-оптических датчиков наклона и смещения в геотехническом мониторинге [6]. Предложены схемы на основе травленных чирпированных ВБР [9], динамические инклинометры на интерферометре Фабри–Перо [10], высокочувствительные маятниковые ВБР-конструкции для мониторинга наклонов [11], температурно-независимые датчики на эксцентричном волокне [12] и интерферометрические конструкции с полимерным волноводом [13].

Общее свойство большинства таких решений состоит в наличии механического преобразователя, маятникового или консольного элемента, либо в ориентации на узкий диапазон углов. Поэтому задача широкодиапазонного волоконно-оптического измерения наклона без твердых подвижных механических узлов в чувствительном объеме остается актуальной [8–13].

Альтернативный подход основан на естественной конвекции газа вокруг нагревателя. В тепловых инерциальных сенсорах информационным носителем является смещение температурного поля, а параметры преобразования определяются геометрией полости,

свойствами газа и положением чувствительных элементов относительно нагревателя [14, 15]. В российской литературе близкие по физике эффекты исследовались применительно к сейсмическим и микроускорительным датчикам на основе ячеек Хеле–Шоу, а также при анализе наклонных режимов естественной конвекции [16–18].

Для волоконно-оптических инклинометров систематический анализ герметичной газонаполненной полости с дифференциальным считыванием парой ВБР, включая совместную оптимизацию размеров полости и положения чувствительных элементов, представлен ограниченно. Настоящая работа направлена на восполнение этого пробела. Цель исследования состоит в построении математической модели волоконно-оптического конвективного инклинометра, определении влияния геометрических параметров на калибровочную зависимость $\Delta\lambda(\alpha)$, изготовлении прототипа и сопоставлении результатов численного моделирования с экспериментом. На рис. 1 приведена качественная иллюстрация того, как изменение угла наклона приводит к перестройке температурного поля и структуры конвективного течения вблизи нагревателя.

Рис. 1. Иллюстрация влияния угла наклона α на температурное поле и структуру конвективных течений вблизи нагревателя:

1. МЕТОДИКА

1.1. Принцип работы и конструкция

Датчик состоит из внешнего корпуса с характерным размером $L = 16$ мм и герметичной кубической полости с ребром a . В центре полости вдоль оси z расположен линейный нагреватель. Две волоконные брэгговские решетки размещены симметрично по оси x на расстоянии x от оси нагревателя. Угол наклона α задает поворот конструкции относительно направления вектора ускорения свободного падения g . На рис. 2 показана расчетная геометрия в принятой системе координат.

Рис. 2. Вертикальное сечение расчетной геометрии датчика

Выходным сигналом служит дифференциальный сдвиг брэгговских длин волн двух ВБР. При одинаковых чувствительных элементах и одинаковых внешних температурных воздействиях такой способ регистрации подавляет общую температурную составляющую в первом приближении и выделяет именно асимметрию температурного поля внутри полости:

$$\Delta\lambda(\alpha) = \lambda_1(\alpha) - \lambda_2(\alpha) = S_T [T_+(\alpha) - T_-(\alpha)] = S_T \Delta T(\alpha). \quad (1)$$

Здесь λ_1 и λ_2 – центральные длины волн первой и второй ВБР, T_+ и T_- – температуры в точках их расположения, ΔT – разность температур, S_T – температурная чувствительность ВБР. В расчетах использовалось значение $S_T = 11$ пм/°С.

1.2. Математическая постановка задачи

Внутри закрытой полости решалась стационарная сопряженная задача естественной конвекции и теплопередачи в приближении Буссинеска. Оценка числа Рэлея для полости с ребром порядка 10 мм и перепадом температур порядка 10^2 °С дает величину порядка 10^4 , что соответствует ламинарному режиму свободной конвекции в рассматриваемой постановке [14, 15]. В этом приближении поле скоростей и давление в газе описываются уравнением движения и уравнением неразрывности:

$$\rho_0(u \nabla)u = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho_0 \beta (T - T_0) g(\alpha), \quad (2)$$

$$u \nabla = 0. \quad (3)$$

Здесь u – вектор скорости, p – давление, ρ_0 – опорная плотность, μ – динамическая вязкость, β – коэффициент объемного теплового расширения, T_0 – опорная температура.

Перенос тепла в газе описывается уравнением энергии

$$\rho_0 c_p (u \nabla T) = \nabla (k_g \nabla T), \quad (3)$$

а в твердых частях корпуса – стационарным уравнением теплопроводности

$$\nabla (k_s \nabla T) = 0. \quad (4)$$

На поверхности нагревателя задавалось условие $T = T_h$. На внешней поверхности корпуса задавался конвективный теплообмен с окружающей средой T_∞ . На границах раздела газ – твердое тело принималась непрерывность температуры и теплового потока. На твердых стенках полости для газа задавалось условие прилипания $u = 0$.

Для выбора геометрии была сформулирована дискретная многокритериальная задача параметрической оптимизации. Цель оптимизации состояла в увеличении чувствительности по углу и одновременном ограничении погрешности линейной аппроксимации в рабочем интервале $0-45^\circ$. Для каждого набора параметров (a, x) строилась калибровочная зависимость $\Delta\lambda(\alpha)$, после чего в интервале $0-45^\circ$ вычислялись коэффициенты линейной регрессии и среднеквадратичная погрешность аппроксимации:

$$(k, b) = \operatorname{argmin} \sum_i [\Delta\lambda_i - (k\alpha_i + b)]^2, S_\alpha = k, \quad (5)$$

$$\varepsilon_{\text{lin}} = \left[\frac{1}{N} \sum_i (\Delta\lambda_i - k\alpha_i - b)^2 \right]^{1/2}. \quad (6)$$

Здесь S_α – чувствительность в пм/°, ε_{lin} – среднеквадратичная погрешность линейной аппроксимации. Для всего диапазона 0–90° дополнительно использовалась аппроксимация полиномом третьей степени.

1.3. Численная реализация и процедура параметрической оптимизации

Трехмерная модель была реализована в COMSOL Multiphysics. В качестве материала корпуса использовался алюминий, в качестве рабочей среды – воздух при атмосферном давлении. Размер внешнего корпуса был фиксирован и составлял $16 \times 16 \times 16 \text{ мм}^3$. Температура нагревателя задавалась равной $T_h = 250 \text{ °C}$, температура окружающей среды – $T_\infty = 20 \text{ °C}$. Используемые в расчете свойства материалов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Свойства материалов, использованные в численной модели

Материал	ρ , кг/м ³	c_p , Дж/(кг·К)	k , Вт/(м·К)	μ , Па·с	β , К ⁻¹
Воздух	1.204	1005	0.0257	$1.81 \cdot 10^{-5}$	$3.41 \cdot 10^{-3}$
Алюминий	2700	900	237	–	–
Кварцевое стекло (область волокна)	2200	703	1.38	–	–

В стационарной постановке свойства материалов принимались постоянными. Для нагревателя свойства материала отдельно не задавались, поскольку на его поверхности использовалось граничное условие изотермической поверхности $T = T_h$.

Параметрическое исследование проводилось по двум геометрическим параметрам: ребро кубической полости a принимало значения 6, 8 и 10 мм, расстояние x от оси нагревателя до ВБР было равно 1, 2 и 3 мм. Угол наклона α изменялся в диапазоне от 0 до 90°. Для каждого сочетания параметров из численного решения извлекались температуры T_+ и T_- в точках установки ВБР, после чего по формуле (1) вычислялся дифференциальный спектральный отклик $\Delta\lambda$.

Процедура параметрической оптимизации выполнялась как полный перебор по сетке 3×3 комбинаций (a, x) . На первом этапе при фиксированном $x = 2$ мм оценивались влияние ребра полости a на амплитуду и монотонность зависимости $\Delta\lambda(\alpha)$. На втором этапе при выбранном $a = 10$ мм анализировались влияние параметра x на чувствительность S_α и погрешность линейной аппроксимации ε_{lin} . Предпочтительной считалась конфигурация, обеспечивающая максимальный дифференциальный сигнал при минимальном значении ε_{lin} в рабочем интервале 0–45°.

По результатам дискретной параметрической оптимизации конфигурация $a = 10$ мм и

$x = 2$ мм была признана предпочтительной в пределах исследованной сетки параметров и при принятой рабочей среде. Глобальная оптимизация по размеру полости, геометрии нагревателя, типу газа и внешнему теплообмену не выполнялась.

1.4. Экспериментальная установка и протокол испытаний

По результатам численного исследования изготовлен прототип датчика (рис. 3) с внешним размером $16 \times 16 \times 16$ мм³ и воздушной полостью $10 \times 10 \times 10$ мм³. Внутри полости в центре располагался линейный нагреватель, а две ВБР размещались симметрично по обе стороны от него на расстоянии $x = 2$ мм. Фотографии собранного прототипа приведены на рис. 3.

Рис. 3. Прототип инклинометра с герметичной полостью, нагревателем и вводами оптических волокон.

В состав экспериментальной установки входили платформа с регулируемым наклоном, исследуемый инклинометр, оптический анализатор сигналов волоконно-оптических датчиков (АСВОД) для получения сигнала ВБР, источник питания нагревателя и электронный инклинометр, закрепленный на той же платформе и использованный в качестве опорного средства задания угла α_{ref} . Схема установки приведена на рис. 4.

Рис. 4. Схема экспериментальной установки: платформа с регулируемым наклоном, АСВОД ВБР, источник питания и опорный электронный инклинометр.

Перед началом измерений нагреватель выдерживался до выхода на стационарный режим в течение 20 мин. Затем угол наклона изменялся ступенчато от 0 до 90° с шагом 5°. На каждой ступени положение выдерживалось в течение 60 с. В процессе выдержки непрерывно регистрировались величины $\lambda_1(t)$ и $\lambda_2(t)$, а в качестве одного калибровочного значения для данного угла использовалось усреднение на квазистационарном участке ступени.

1.5. Показатели метрологического анализа

Чувствительность по углу определялась как коэффициент линейной аппроксимации $S_\alpha = d\Delta\lambda/d\alpha$ на выбранном участке калибровочной характеристики. При известном спектральном разрешении АСВОД $\delta\lambda_{\text{int}}$ эквивалентное угловое разрешение оценивалось выражением

$$\delta\alpha = \frac{\delta\lambda_{\text{int}}}{S_\alpha}. \quad (8)$$

Повторяемость определяется по серии повторных циклов нагружения как разброс показаний при одном и том же угле. Гистерезис определяется как расхождение между ветвями “увеличение угла” и “уменьшение угла”. Дрейф нуля оценивается по долговременной записи $\Delta\lambda$ при $\alpha = 0$, а влияние внешней температуры – по серии климатических испытаний с контролируемым изменением температуры окружающей среды. В текущем экспериментальном протоколе надежно определены только монотонность калибровочной зависимости и чувствительность; перечисленные метрологические параметры требуют отдельной программы валидации.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Результаты численного моделирования

На рис. 5 представлены поля скорости и температуры при $\alpha = 0, 45^\circ, 90^\circ$ для конфигурации с температурой нагревателя 250°C . При $\alpha = 0$ распределение температуры относительно оси x практически симметрично, поэтому $T_+ \approx T_-$ и дифференциальный сигнал близок к нулю. С ростом α симметрия нарушается: тепловой факел отклоняется, линии тока перестраиваются, а между точками расположения ВБР возникает монотонно растущая разность температур.

Рис. 5. Расчетные поля скорости (а) и температуры (б) при углах наклона $0, 45^\circ$ и 90° .

На рис. 6 приведены расчетные зависимости $\Delta T(\alpha)$ и $\Delta\lambda(\alpha)$ для полостей с ребром $a = 6, 8, 10$ мм при фиксированном расстоянии $x = 2$ мм. Увеличение a приводит к росту дифференциального отклика по всему диапазону углов. С физической точки зрения, это согласуется с ростом числа Рэлея по закону $Ra \propto a^3$: при увеличении характерного размера полости естественная конвекция становится более развитой, а температурная асимметрия относительно точек контроля усиливается [11, 12]. В пределах исследованного набора параметров максимальный сигнал соответствует величине $a = 10$ мм.

Рис. 6. Расчетные зависимости дифференциальной температуры ΔT и спектрального

На рис. 7 показано влияние расстояния x между осью нагревателя и ВБР при фиксированном ребре полости $a = 10$ мм. При $x = 1$ мм чувствительность максимальна, поскольку ВБР располагаются в области наибольшего температурного градиента. Однако в этом случае сильнее проявляется нелинейность отклика на больших углах. При $x = 3$ мм отклик становится более пологим и чувствительность уменьшается. Конфигурация $x = 2$ мм обеспечивает промежуточный режим и наименьшую ошибку линейной аппроксимации в интервале до 45° .

Рис. 7. Расчетные зависимости дифференциальной температуры ΔT и спектрального

Из табл. 2 следует, что конфигурация с $x = 2$ мм обеспечивает чувствительность 4.47 пм/° при среднеквадратичной погрешности линейной аппроксимации 0.23 пм. Для полного диапазона 0–90° использование полинома третьей степени дополнительно уменьшает ошибку аппроксимации, однако для практической калибровки в рабочем интервале до 45° линейная модель оказывается достаточной.

Таблица 2. Параметры линейной аппроксимации расчетных калибровочных зависимостей в диапазоне 0–45°

x , мм	Линейная модель $\Delta\lambda = b + k\alpha$	$S_\alpha = k$, пм/°	СКО линейной аппроксимации, пм	СКО полинома 3-й степени, пм
1	$\Delta\lambda = 6.486 + 5.848\alpha$	5.848	1.674	0.149
2	$\Delta\lambda = -0.653 + 4.473\alpha$	4.473	0.231	0.219
3	$\Delta\lambda = -1.358 + 2.816\alpha$	2.816	0.714	0.574

2.2. Экспериментальные результаты

На рис. 8а приведена характерная временная запись дифференциального спектрального отклика $\Delta\lambda(t)$ при последовательном ступенчатом изменении угла. Сигнал переходит между квазистационарными уровнями, соответствующими отдельным положениям платформы. Таким образом, эксперимент подтверждает принципиальную работоспособность дифференциального считывания парой ВБР.

По оси абсцисс на рис. 8б отложены показания опорного электронного инклинометра α_{ref} . Использование времени в качестве независимой переменной на этом графике не означает самопроизвольного отклонения дифференциального спектрального отклика; изменение сигнала обусловлено дискретным изменением угла.

Рис. 8. Экспериментальные данные:

После усреднения стационарных участков по каждой ступени была построена калибровочная зависимость $\Delta\lambda(\alpha_{\text{ref}})$, приведенная на рис. 8б. В диапазоне от 0 до 65° экспериментальные точки хорошо описываются линейной зависимостью с чувствительностью 6.6 пм/°. Для больших углов появляется систематическое отклонение от линейного закона и наблюдается тенденция к насыщению отклика, что качественно согласуется с расчетом.

Для экспериментального участка 0–65° линейная модель записывается в виде

$$\Delta\lambda = 2.7 + 6.6 \alpha_{\text{ref}},$$

где $\Delta\lambda$ выражено в пикометрах, а α_{ref} – в градусах. При дальнейшем анализе именно это выражение использовалось для оценки эквивалентного углового разрешения.

Таблица 3. Оценка углового разрешения при различных спектральных разрешениях АСВОД

$\delta\lambda_{\text{int}}$, пм	Расчетное значение $\delta\alpha$
5.0	0.758°
1.0	0.152°
0.5	0.076°
0.1	0.015°

Таблица 3 представляет расчетную оценку по формуле (8) при использовании экспериментальной чувствительности $S_\alpha = 6.6$ пм/°. Эти значения не являются самостоятельным результатом испытаний АСВОД; они показывают, как спектральное разрешение опросной системы переносится в эквивалентное угловое разрешение датчика.

В результате с учетом погрешности по серии измерений чувствительность составила $S_\alpha = (6.55 \pm 0.04)$ пм/°. При этом гистерезис достигал значений до 30 пм. Такой разброс может быть обусловлен тем, что внешняя температура не контролировалась и не поддерживалась постоянной.

3. АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Сопоставление расчета и эксперимента

Расчетная чувствительность для выбранной конфигурации составила 4.47 пм/° в диапазоне до 45°, тогда как экспериментальная линейная аппроксимация до 65° дала значение 6.55 пм/°. Такое расхождение не должно интерпретироваться как прямое противоречие между расчетом и экспериментом, поскольку сравниваются результаты, полученные при разных уровнях идеализации и при разных интервалах аппроксимации.

К наиболее вероятным источникам расхождения относятся несколько факторов. При расчете чувствительность ВБР к температуре учитывалась как 11 пм/°С, но в реальности при закреплении волокна в алюминиевый корпус необходимо рассматривать чувствительность около 31.9 пм/°С [19]. Также реальная максимальная температура нагревателя составила по оценкам 150 °С. С учетом поправок в параметрах моделирования угловая чувствительность макета инклинометра составила 6.38 пм/°, что делает результат расчета более близким к результатам эксперимента.

Также расхождение может объясняться другими причинами, а именно: использованием приближения постоянных свойств воздуха, в то время как вязкость, теплопроводность и

плотность газа зависят от температуры; неопределенностью внешнего теплообмена корпуса с окружающей средой; возможными технологическими отклонениями в реальном положении ВБР относительно нагревателя; переходом от строго стационарной модели к квазистационарному эксперименту с конечным временем выдержки на ступени. В текущей постановке модель корректно воспроизводит физический механизм, монотонность отклика и порядок величины чувствительности, но не претендует на точную идентификацию всех тепловых параметров макета без дополнительных измерений.

3.2. Влияние геометрических параметров и физическая интерпретация

По результатам численного исследования установлены два принципиальных компромисса. Во-первых, увеличение ребра полости a усиливает естественную конвекцию и тем самым повышает дифференциальный сигнал, однако одновременно изменяет пространственную структуру температурного поля. Во-вторых, уменьшение расстояния x между нагревателем и ВБР повышает чувствительность, но приводит к ухудшению линейности калибровочной характеристики.

Отдельного рассмотрения требует роль рабочей среды. Для тепловых инерциальных датчиков известно, что изменение типа газа, его вязкости и теплопроводности может существенно менять чувствительность и частотные свойства преобразования [14, 15]. В рассматриваемой работе в качестве рабочей среды использовался воздух; следовательно, полученные численные и экспериментальные результаты относятся именно к этой среде и не могут быть непосредственно перенесены на другие газы без повторного расчета и испытаний.

3.3. Сравнение с другими типами инклинометров

Сравнение с прецизионными уровнями и узкодиапазонными электронными датчиками показывает, что предложенная конструкция не относится к классу датчиков микроградусного уровня. Например, высокоточный пузырьковый уровень WYLER 55 SPIRIT имеет чувствительность 0.02 мм/м, что соответствует приблизительно 0.00115° , при диапазоне ± 0.06 мм/м, т. е. около $\pm 0.00344^\circ$ [3]. Электролитический датчик The Fredericks Company 0711-0763-99 обеспечивает диапазон $\pm 1^\circ$, разрешение не хуже 0.0003° и повторяемость $\pm 0.0008^\circ$ [2]. По этим параметрам предложенный конвективный датчик уступает специализированным малодиапазонным системам, но превосходит их по исследованному диапазону углов.

С другой стороны, широкодиапазонные электрические MEMS-инклинометры, такие как POSITAL TILTIX, перекрывают диапазон $\pm 90^\circ$ при разрешении 0.01° и паспортной точности порядка $\pm 0.10^\circ$ для конкретных моделей [1]. Коммерческие волоконно-оптические инклинометры Luna os8100 и HBK FS64, напротив, ориентированы на малые углы: os8100

имеет диапазон 10° и разрешение 0.002° [20], а FS64 предназначен для измерения очень малых отклонений от вертикали [21]. Следовательно, предложенная схема занимает промежуточную нишу: она ориентирована на широкодиапазонное квазистатическое измерение угла при оптическом удаленном считывании.

Таблица 4. Сопоставление предложенного датчика с представителями других классов инклинометров

Класс / пример	Диапазон	Характеристика из источника	Комментарий
Пузырьковый уровень WYLER 55 SPIRIT [21]	± 0.06 мм/м ($\approx \pm 0.00344^\circ$)	Чувствительность 0.02 мм/м ($\approx 0.00115^\circ$)	Измерение очень малых отклонений около горизонта
Электролитический датчик Fredericks 0711-0763-99 [17]	$\pm 1^\circ$	Разрешение не хуже 0.0003° ; повторяемость $\pm 0.0008^\circ$	Узкий диапазон, высокая точность
MEMS-инклинометр POSITAL TILTX [16]	$\pm 90^\circ$	Разрешение 0.01° ; точность $\pm 0.10^\circ$	Широкий диапазон, электрический датчик
Оптический датчик Luna os8100 [18]	10°	Разрешение 0.002°	Оптическое считывание, малый диапазон
Предлагаемый конвективный ВБР-инклинометр	$0-90^\circ$ (испытано)	6.6 пм/ $^\circ$; около 0.15° при $\delta\lambda_{\text{int}} = 1$ пм	Широкий диапазон, без твердых подвижных узлов в полости

Сравнение с научной литературой дает аналогичный вывод. Механически усиленные и интерференционные волоконно-оптические инклинометры обеспечивают значительно более высокую чувствительность или разрешение, но обычно работают в меньших диапазонах. Так, в маятниковом ВБР-датчике для мониторинга наклонов сообщается чувствительность 406.6 пм/ $^\circ$ [11], для датчика на массивах травленных чирпированных ВБР сообщается разрешение 0.003° [9], а для динамического интерферометрического датчика Фабри–Перо – $0.03''$ в диапазоне $\pm 1^\circ$ [10]. На этом фоне предложенный конвективный инклинометр следует рассматривать не как замену высокоточным малодиапазонным уровням, а как широкодиапазонный волоконно-оптический датчик для квазистатического мониторинга, где существенны оптическое удаленное считывание и отсутствие твердых подвижных механических узлов в чувствительном объеме.

3.4. Ограничения исследования

Текущая серия экспериментов демонстрирует монотонность отклика и позволяет оценить чувствительность, однако не обеспечивает полной метрологической аттестации датчика. Для завершения такой аттестации необходимы повторные циклы нагружения и разгружения с количественной оценкой повторяемости и гистерезиса, а именно: длительная регистрация сигнала при $\alpha = 0$ для оценки дрейфа нуля; испытания в климатической камере для определения коэффициента влияния внешней температуры; отдельное измерение фактической температуры нагревателя; указание модели, точности и разрешения опорного электронного инклинометра и АСВОД.

Кроме того, используемая численная модель является стационарной и потому не позволяет предсказывать время установления сигнала. Для динамических режимов требуется нестационарная постановка с прямым расчетом переходного процесса. С практической точки зрения, это означает, что текущая конструкция ориентирована прежде всего на квазистатическое измерение наклона, а не на высокочастотные динамические воздействия.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построена трехмерная стационарная модель волоконно-оптического конвективного инклинометра с воздушной кубической полостью и дифференциальным считыванием парой ВБР. В исследованной области параметров $a = 6\text{--}10$ мм и $x = 1\text{--}3$ мм наилучший компромисс между чувствительностью и линейностью получен для конфигурации $a = 10$ мм и $x = 2$ мм.

Изготовленный прототип с полостью $10 \times 10 \times 10$ мм³ продемонстрировал монотонную калибровочную зависимость в диапазоне $0\text{--}90^\circ$. Линейная аппроксимация экспериментальных данных до 65° дала чувствительность 6.6 пм/ $^\circ$. При спектральном разрешении АСВОД 1 пм это соответствует оценке углового разрешения около 0.15° .

По совокупности результатов предложенная конструкция относится к классу широкодиапазонных волоконно-оптических инклинометров для квазистатического мониторинга. По точности она не заменяет пузырьковые и электролитические уровни узкого диапазона, но обеспечивает существенно больший интервал измерений при оптическом удаленном считывании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. POSITAL. ACS-090-2-CA01-HE3-PM: TILTIX 2-Axes Inclinometer.

<https://www.posital.com/en/products/inclinometers/ACS-090-2-CA01-HE3-PM/3238318> .

2. The Fredericks Company. 0711-0763-99 $\pm 1^\circ$ Glass Single-Axis Electrolytic Tilt Sensor. <https://www.frederickscompany.com/products/0711-0763-99/>
3. WYLER AG. High-precision spirit levels. URL: <https://www.wylerag.com/en/products/high-precision-spirit-levels/>
4. Joe H.-E., Yun H., Jo S.-H., Jun M.B.G., Min B.-K. Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Tech. 2018. V. 5. № 1. P. 173. <https://doi.org/10.1007/s40684-018-0017-6>
5. Deng Y., Jiang J. // IEEE Sensors J. 2022. V. 22. № 14. P. 13811. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3181949>
6. Pei H.-F., Yin J.-H., Jin W. Meas. Sci. Technol. 2013. V. 24. № 9. P. 095202. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/9/095202>
7. Chen H.-J., Wang L., Liu W.F. Appl. Opt. 2008. V. 47. № 4. P. 556. <https://doi.org/10.1364/AO.47.000556>
8. Bao H., Dong X., Shao L.-Y., Zhao C.-L., Chan C.C., Shum P. IEEE Photonics Technol. Lett. 2010. V. 22. № 12. P. 863. <https://doi.org/10.1109/LPT.2010.2046630>
9. Chang H.-Y., Chang Y.-C., Liu W.-F. Sensors. 2017. V. 17. № 12. P. 2922. <https://doi.org/10.3390/s17122922>
10. Yang Y., Ma X., Chen K., Wang E., Yu Z., Yu Q. Sens. Actuators A: Phys. 2018. V. 283. P. 305. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.10.007>
11. Xu H., Li F., Zhao W., Wang S., Du Y., Bian C. J. Sensors. 2019. V. 2019. P. 1354029. <https://doi.org/10.1155/2019/1354029>
12. Zheng D., Cai Z., Floris I. et al. Opt. Lett. 2019. V. 44. № 22. P. 5570. <https://doi.org/10.1364/OL.44.005570>
13. Huang C., Chen H., Cheng C. et al. Opt. Express. 2024. V. 32. № 20. P. 34431. <https://doi.org/10.1364/OE.537226>
14. Liu S., Zhu R. Sensors. 2017. V. 17. № 2. P. 367. <https://doi.org/10.3390/s17020367>
15. Siddique K., Ogami Y. Sensors. 2022. V. 22. № 18. P. 6744. <https://doi.org/10.3390/s22186744>
16. Бабушкин И.А., Глухов А.Ф., Демин В.А Вестник Пермского университета. Сер.: Физика. 2008. № 1. С. 3.
17. Бабушкин И.А., Глухов А.Ф., Демин В.А. и др. Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2009. № 2. С. 72.
18. Кондрашов А.Н., Бабушкин И.А. Вестник Пермского университета. Сер.: Физика. 2012. № 1. С. 23. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17754605>
19. Xueqiang Z., Bo S., Jing J. Infrared and Laser Engineering. 2019. V. 48. №. 11. P. 1118003.
20. Luna Innovations. os8100 Optical Tilt Sensor. <https://lunainc.com/product/os8100>

21. HBK FiberSensing. FS64 Tilt Optical Sensor.

<https://www.hbkworld.com/en/products/transducers/tilt/fs64tls>.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Иллюстрация влияния угла наклона α на температурное поле и структуру конвективных течений вблизи нагревателя: **а** – $\alpha = 0$; **б** – $\alpha = 45^\circ$; **в** – $\alpha = 90^\circ$
- Рис. 2.** Вертикальное сечение расчетной геометрии датчика
- Рис. 3.** Прототип инклинометра с герметичной полостью, нагревателем и вводами оптических волокон
- Рис. 4.** Схема экспериментальной установки: платформа с регулируемым наклоном, АСВОД ВБР, источник питания и опорный электронный инклинометр
- Рис. 5.** Расчетные поля скорости (**а**) и температуры (**б**) при углах наклона $0, 45^\circ$ и 90°
- Рис. 6.** Расчетные зависимости дифференциальной температуры ΔT и спектрального отклика $\Delta\lambda$ от угла наклона α при разных значениях ребра полости a и фиксированном расстоянии $x = 2$ мм
- Рис. 7.** Расчетные зависимости дифференциальной температуры ΔT и спектрального отклика $\Delta\lambda$ от угла наклона α при разных значениях расстояния x от нагревателя до ВБР и фиксированном ребре полости $a = 10$ мм
- Рис. 8.** Экспериментальные данные: **а** – временная зависимость дифференциального спектрального отклика $\Delta\lambda(t)$ при ступенчатом изменении угла, **б** – калибровочная зависимость $\Delta\lambda(\alpha_{\text{ref}})$, где α_{ref} – показания опорного электронного инклинометра

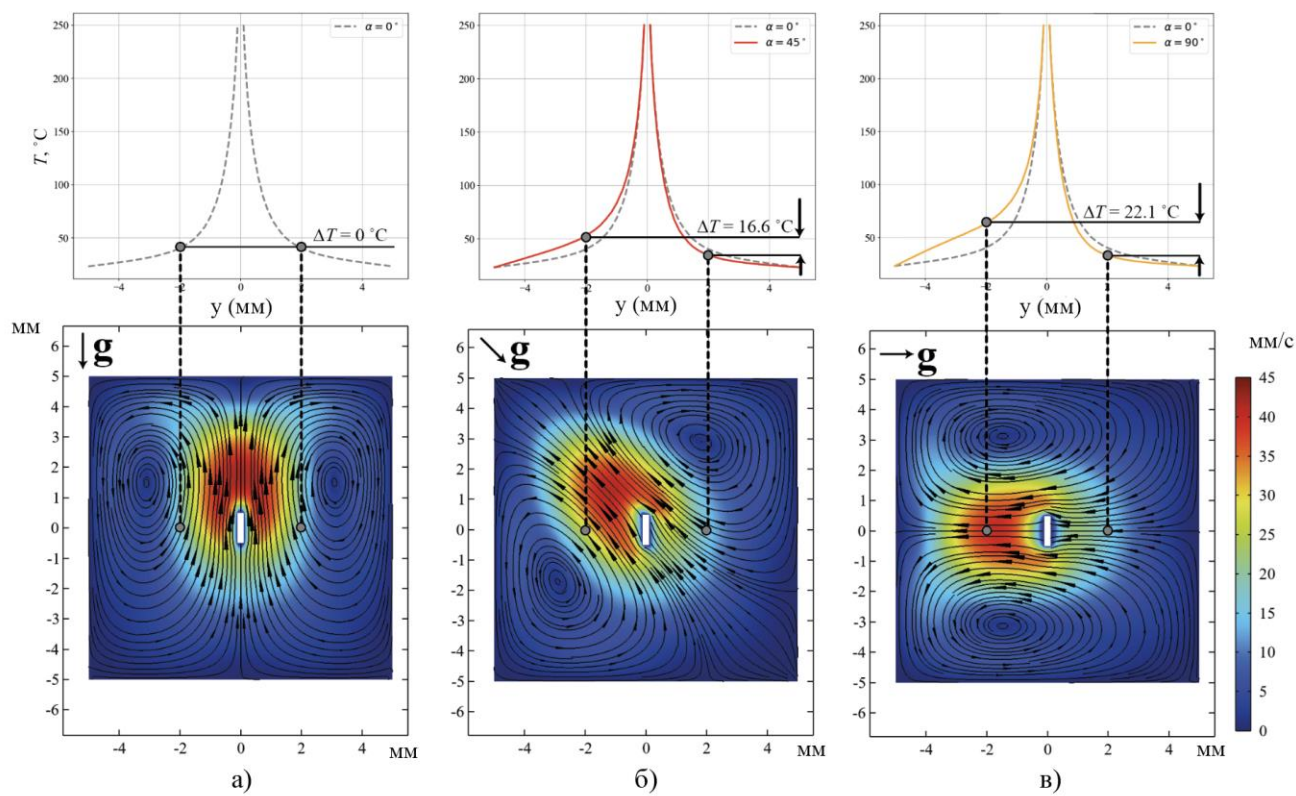


Рис. 1.

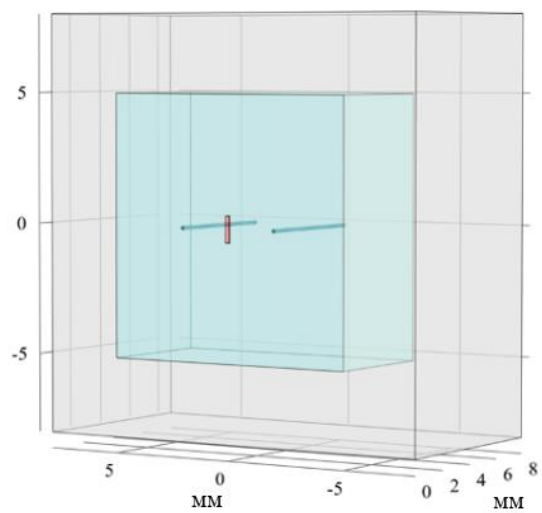


Рис. 2.

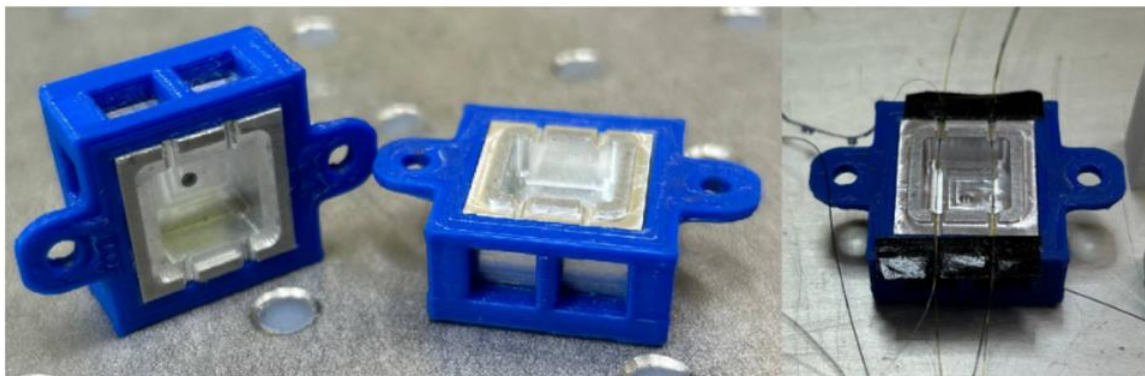


Рис. 3.

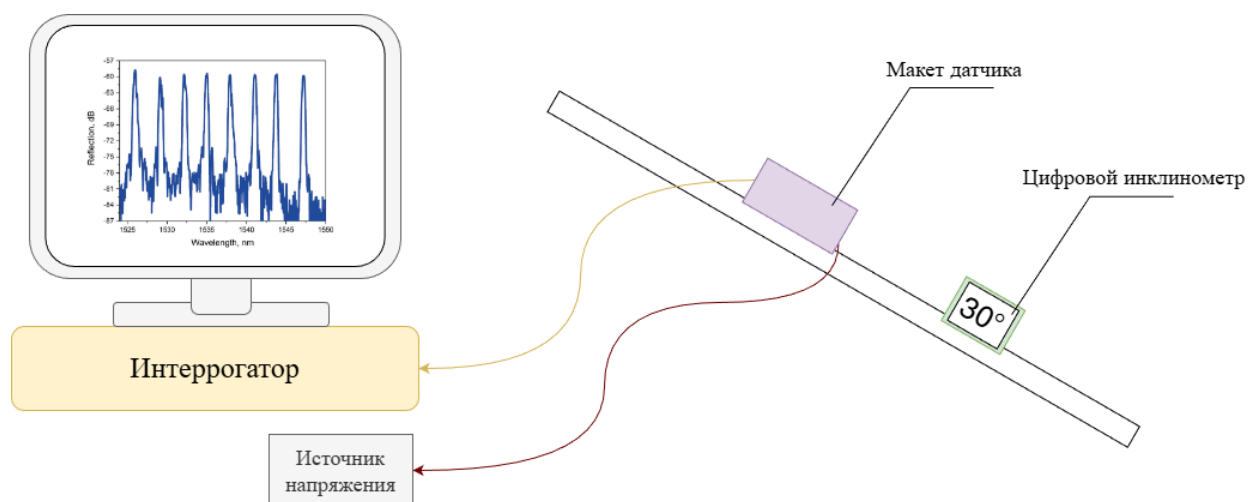


Рис. 4.

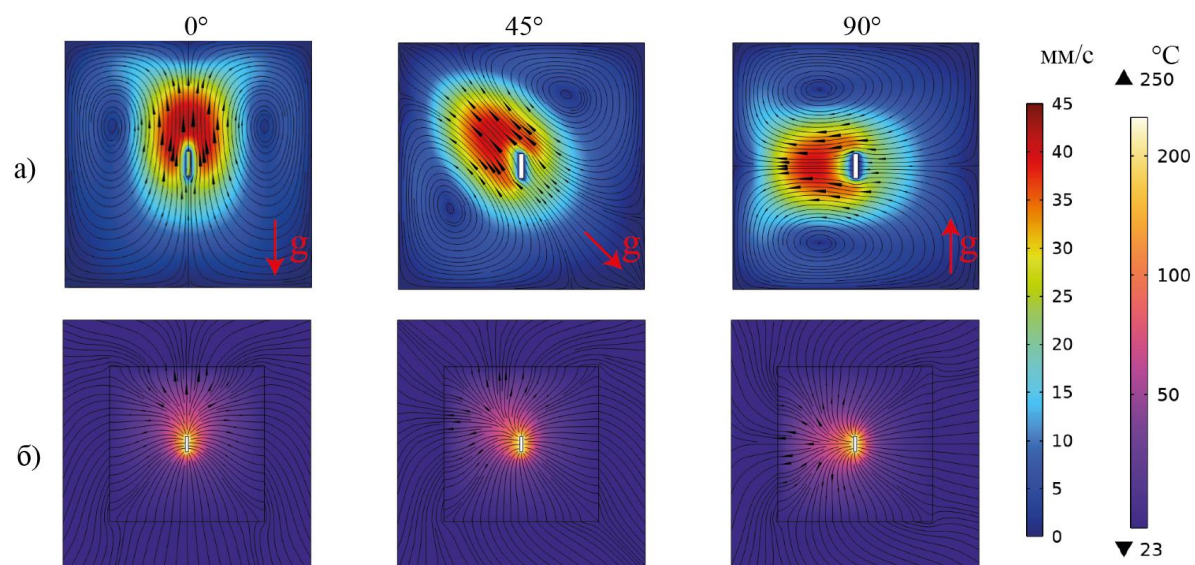


Рис. 5.

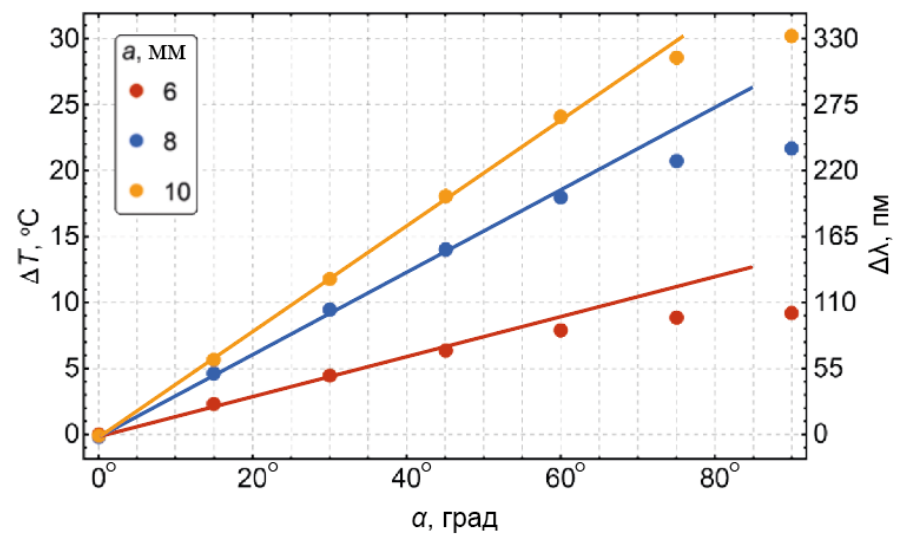


Рис. 6.

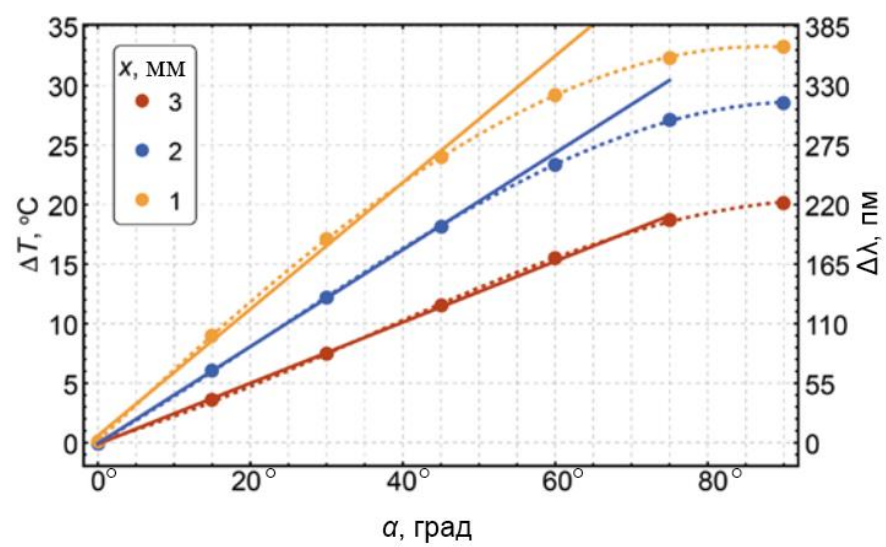


Рис. 7.

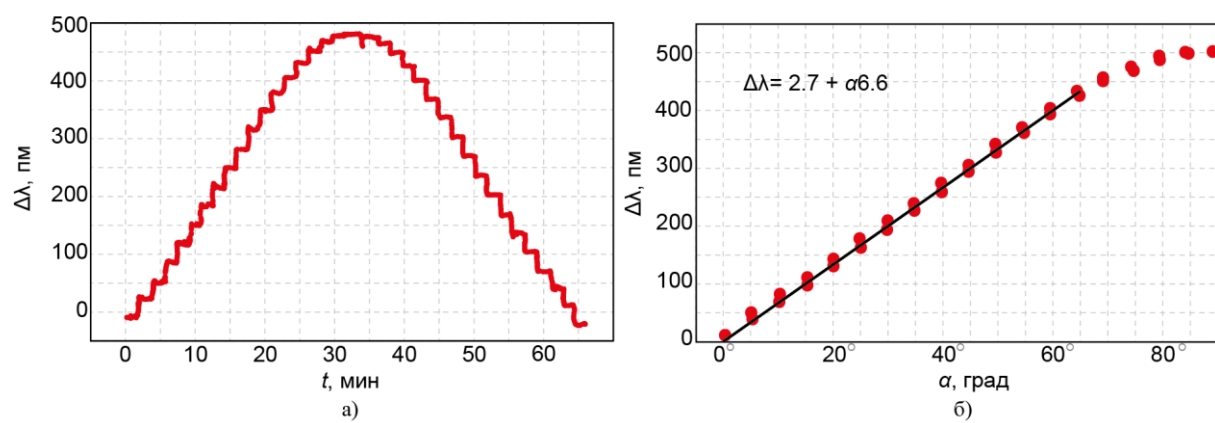


Рис. 8.