

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 53.08

**РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК
РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРА,
АРМИРОВАННОГО ВОЛОКНОМ¹**

**©2026 г. В. В. Приходько, А. В. Трегубов, А. С. Алексеев, С. Г. Новиков,
М. В. Прибылов*, И. С. Паняев, А. И. Абанин**

Ульяновский государственный университет

Россия, 432017, Ульяновск, ул. Льва Толстого, 42

**E-mail: pribylovmv@stud.ulsu.ru*

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 13.05.2026

Принята к публикации 06.07.2026

Представлены результаты численного моделирования и экспериментального исследования нового типа распределенного волоконно-оптического калориметрического дозиметра, датчик которого интегрирован в полимер, армированный волокном. Конструктивно датчики выполнены в виде полимерной арматуры, внутри которой размещены оптическое волокно и вольфрамовые проволоки, выполняющие функцию поглотителей ионизирующего излучения. Регистрация тепловыделения, индуцированного излучением, осуществляется методом бриллюэновского оптического анализа во временной области. Результаты численного моделирования, выполненного с использованием пакетов Geant4 и Ansys, свидетельствуют об эффективном поглощении излучения и последующей теплопередаче, при этом полученные характеристики сопоставимы с характеристиками ранее исследованных точечных калориметрических датчиков. Изготовлены экспериментальные образцы, испытанные при дозе облучения мощностью 1.13–9.19 кГр/ч от источника ⁶⁰Со. Показано, что как линейные, так и точечные датчики демонстрируют схожие значения прироста температуры, достигающие 26 °С. Проведена оценка постоянных времени отклика; установлено, что более медленный отклик линейного датчика может быть обусловлен теплопроводностью вдоль вольфрамовых проволок. В результате калибровки определены коэффициенты пересчета “мощность дозы – температура”, составившие 0.48 кГр/(ч·°С) для линейного датчика и 0.35 кГр/(ч·°С) для точечных датчиков. Пределы чувствительности составили соответственно 0.1 и 0.28 кГр/ч.

Ключевые слова: волоконно-оптический дозиметр, калориметрический датчик, полимерная арматура, вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы распределенные волоконно-оптические сенсорные системы (DFOS) находят все более широкое применение при мониторинге крупномасштабных инженерных сооружений, таких как мосты [1–4], высотные здания [5], армированные грунтовые конструкции

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

[6], трубопроводы [7, 8], тоннели [9–11] и др. Данная технология обеспечивает распределенное измерение деформаций и температуры с высокой точностью и пространственным разрешением на протяженностях от нескольких метров до десятков километров. Оптическое волокно, выполняющее функцию чувствительного элемента, может быть закреплено на поверхности конструкции либо встроено в нее.

Для измерения деформаций и температуры вдоль волокна в DFOS, как правило, используются эффекты рэлеевского, комбинационного и бриллюэновского рассеяния, а также мультиплексированные волоконные брэгговские решетки. Каждый метод обладает своими преимуществами с точки зрения пространственного разрешения, точности и дальности детектирования [12–15]. Среди методов рефлектометрии вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ) обеспечивает наибольшую дальность измерений при сохранении высокой точности и пространственного разрешения.

Для целей дозиметрии применение указанных подходов пока ограничено, хотя в ряде областей распределенная дозиметрия представляет значительный интерес, позволяя решать такие задачи, как измерение поглощенной дозы в радиотерапии [16, 17] и брахитерапии [18], оценку пространственного распределения дозы в линейных электронных и протонных ускорителях медицинского назначения [19–21], дистанционный мониторинг грунтовых вод и почв на предмет радиоактивного загрязнения [22], задачи радиационной защиты и контроля на ядерных объектах [23], мониторинг радиоактивных отходов [24], космическая дозиметрия [25] и др. В большинстве таких приложений для регистрации ионизирующего излучения используются сцинтилляционные волокна, эффекты радиационно-индуцированного затухания или люминесценции.

Ранее нами был предложен новый тип радиационного датчика – распределенный калориметрический дозиметр, основанный на использовании термически изолированных металлических детекторов точечного типа (сферических и цилиндрических), закрепленных на оптическом волокне с определенным шагом [26, 27]. В таких датчиках регистрация ионизирующего излучения осуществляется путем измерения нагрева детектора, обусловленного поглощением энергии, что делает их в значительной степени независимыми от спектра излучения. Для измерения распределения температуры вдоль волокна используется анализатор бриллюэновского рассеяния во временной области (BOTDA).

В настоящей работе данный подход развит применительно к линейному калориметрическому датчику на основе полимера, армированного волокном, в котором нити-поглотители излучения и оптическое волокно интегрированы в полимерную оболочку с низкой теплопроводностью, выполненную в виде арматурного стержня. Полимерная матрица выполняет одновременно функции несущей конструкции и тепловой изоляции, тогда как

наполнители с высоким атомным номером (например, вольфрамовые проволоки) обеспечивают поглощение излучения с последующим преобразованием энергии в тепло, регистрируемое методом BOTDA. Волоконно-оптические датчики на основе полимерной арматуры могут изготавливаться практически произвольной длины с использованием отработанных технологий, включая аддитивное производство и пултрузию [28–30].

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1. Экспериментальная установка

Предлагаемая конструкция датчика представлена на рис. 1 в поперечном сечении, она включает оболочку 1, выполненную из композиционного полимерного материала с низкой теплопроводностью, внутри которой размещены нити-поглотители ионизирующего излучения 2 и оптическое волокно 3.

Рис. 1. Конструкция линейного калориметрического датчика (поперечное сечение):

В качестве чувствительного элемента в прототипе дозиметра использовалось одномодовое оптическое волокно типа SMF28e 9/125. С целью снижения неконтролируемых механических напряжений была также исследована альтернативная конфигурация с использованием волокна в металлической оболочке.

В качестве поглощающих элементов применялись шесть вольфрамовых проволок диаметром 0.25 мм, что обусловлено высоким коэффициентом ослабления излучения в вольфраме (1.27 см^{-1} при энергии 1000 кэВ).

Полимерная матрица формировалась на основе эпоксидной смолы. Данный материал характеризуется технологичностью и низкой теплопроводностью, что является существенным для реализации калориметрического принципа измерений. Теплопроводность эпоксидной смолы составляет 0.1–0.2 Вт/(м·К), что является одним из наименьших значений среди полимерных материалов данного класса.

2.2. Изготовление датчика

Технология изготовления линейного калориметрического датчика разработана совместно с Galen LLC (г. Ульяновск). Основные этапы технологического процесса включали в себя

- размещение катушек стеклоровинга на шпулярнике;
- протяжку ровинга через систему натяжения нитей, ванну пропитки, формирующе-распределительное кольцо, фильеру, нагревательные тоннели (печи) и вытяжной механизм;
- фиксацию катушки с оптическим волокном по центру фильерного узла в прямом направлении;

- размещение бобин с нитями-поглотителями излучения по периметру фильерного узла;
- запуск процесса протяжки со скоростью 1.5–2 м/мин;
- введение оптического волокна через центральное отверстие формирующе-распределительного кольца с последующей подачей в фильерный узел через центратор для оптического волокна.

Для подключения датчика к измерительной аппаратуре на его концах установлены защищенные оптические разъемы.

2.3. Моделирование

Для оценки эффективности предложенной конструкции выполнено численное моделирование взаимодействия линейного калориметрического датчика с ионизирующим излучением с использованием программного пакета Geant4. В качестве источника излучения рассматривался ^{60}Co ; поглощающим материалом служил вольфрам, диаметр нитей составлял 250 мкм, полимерная матрица моделировалась как эпоксидная смола.

Распределение поглощенной энергии в объеме датчика, полученное методом Монте-Карло в Geant4, использовалось в качестве исходных данных для моделирования теплопереноса. Анализ теплопереноса проводился методом конечных элементов в модуле Transient Thermal программного пакета Ansys.

2.4. Радиационные испытания

Экспериментальные исследования прототипа дозиметра проводились во Всероссийском научно-исследовательском институте радиологии и агроэкологии (г. Обнинск) на гамма-установке ГУР-120. В качестве источника использовался ^{60}Co типа ГИК-7-4. Мощность дозы регулировалась изменением расстояния до источника. Контроль поглощенной дозы осуществлялся с помощью пленочного дозиметра СО ПД(Ф)Р-5/50 производства ФГУП ВНИИФТРИ.

Изготовлены следующие варианты калориметрических датчиков:

- композитный линейный датчик в виде арматуры с центральным оптическим волокном, окруженным шестью вольфрамовыми нитями;
- датчик точечного типа – цельнометаллический свинцовый цилиндр (диаметром 50 мм, длиной 50 мм) с намотанным на него оптическим волокном, помещенный в теплоизолирующий контейнер из пенополистирола толщиной 20 мм.

Измерение температуры вдоль волокна осуществлялось с использованием распределенного датчика деформации и температуры (DSTS) компании OZ Optics в режиме BOTDA. Пространственное разрешение составляло 1 м. Погрешность измерения температуры составила ± 0.3 °C.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изготовлен образец композитной арматуры длиной 100 м, содержащий оптическое волокно и вольфрамовые проволоки. Из данной заготовки было получено несколько прототипов линейного калориметрического датчика с различными длинами (рис. 2) – от 3 до 10 м. Для проведения сравнительных исследований также был изготовлен волоконно-оптический калориметрический датчик точечного типа. С целью повышения компактности в одном свинцовом цилиндре были размещены три витка оптического волокна длиной по 1 м, что эквивалентно трем точечным датчикам (рис. 3).

Рис. 2. Линейный калориметрический датчик в виде полимерной арматуры

Рис. 3. Калориметрический датчик точечного типа с тремя витками оптического волокна

Численное моделирование взаимодействия линейного калориметрического датчика с ионизирующим излучением показало, что энергия излучения эффективно преобразуется в тепло в поглощающих элементах и передается к оптическому волокну (рис. 4). Результаты моделирования свидетельствуют о том, что использование вольфрама в качестве поглотителя и эпоксидной смолы в качестве теплового изолятора обеспечивает эффективность линейного датчика, сопоставимую с точечными датчиками на основе массивных металлических элементов и пенополистирола в качестве изолятора.

Рис. 4. Результаты численного моделирования распределения температуры в объеме линейного калориметрического датчика при поглощении излучения вольфрамовыми проволоками

Радиационные испытания проводились при пяти значениях мощности дозы: 1.13, 1.54, 3.28, 4.94 и 9.19 кГр/ч. В ходе экспериментов зафиксирован заметный нагрев калориметрических элементов как для линейной, так и для точечной конфигурации датчиков. На рис. 5 приведен температурный профиль, полученный методом BOTDA в результате гамма-облучения в течение 4 ч при мощности дозы 4.94 кГр/ч. Левый максимум соответствует линейному датчику, правый – точечному. Зависимость температуры от времени нагрева демонстрировала экспоненциальный характер с последующим насыщением. Как видно на рис. 5, при дозе мощностью 4.94 кГр/ч температура линейного датчика достигала 11 °С, тогда как для точечного датчика она составляла 13 °С. Максимальное приращение температуры (26 °С) было зафиксировано для датчика точечного типа при облучении мощностью 9.19 кГр/ч.

Рис. 5. Профиль температуры вдоль оптического волокна, полученный через 4 ч

Для каждого значения мощности дозы регистрировались температурные профили в различные моменты времени. На рис. 6 представлены температурные профили вдоль оси линейного композитного датчика, полученные при дозе мощностью 4.94 кГр/ч в моменты 0, 1, 2, 3, 4 и 5 ч от начала нагрева.

Рис. 6. Профили температуры вдоль линейного калориметрического датчика,

Путем аппроксимации данных методом наименьших квадратов определены постоянные времени установления стационарного режима. Для линейного датчика насыщение достигалось примерно через 4 ч (экспоненциальная постоянная времени – 97 мин), тогда как для точечного датчика – через 3.5 ч (экспоненциальная постоянная времени – 86 мин). Более высокое значение постоянной времени линейного датчика, по-видимому, обусловлено вкладом теплопроводности вдоль вольфрамовых проволок. Действительно, коэффициент температуропроводности вольфрама, равный $(6-8) \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, достаточно велик (примерно в 4–6 раз выше, чем у стали), что может приводить к диффузии части тепла вдоль датчика и замедлению роста температуры в области тепловыделения в соответствии с уравнением теплопроводности.

Были построены калибровочные зависимости “температура – мощность дозы”, имеющие линейный вид в соответствии с теоретическими расчетами [27]. На основе данных зависимостей определены коэффициенты пересчета из температуры в мощность дозы: 0.35 кГр/(ч·°C) для точечных датчиков и 0.48 кГр/(ч·°C) для линейного датчика. Исходя из погрешности измерения температуры методом BOTDA были рассчитаны пределы чувствительности прототипов дозиметра: 0.28 и 0.1 кГр/ч для точечного и линейного датчиков соответственно. Как отмечалось ранее [26], верхний предел рабочего диапазона калориметрического дозиметра ограничен температурами плавления входящих в его состав материалов. Температура термической деградации эпоксидной смолы (300–400 °C), используемой в линейном датчике, сопоставима с температурой плавления свинца – основного элемента точечного датчика, вследствие чего верхние пределы рабочего диапазона для обоих типов датчиков оказываются близкими – порядка 100 кГр/ч.

Наличие калориметрических элементов позволяет значительно улучшить возможности обычного оптического волокна по регистрации гамма-радиации. В работе [31] было показано, что в коммерческих волокнах при облучении дозой 10 МГр достигается сдвиг бриллюэновской частоты на величину 5 МГц, что, очевидно, является недостаточным для практических приложений. Предложенный в настоящей работе дозиметр при дозах, меньших на два порядка, обеспечивает сдвиг частоты на величину приблизительно 400 МГц, что обеспечивает в 8000 раз более высокую чувствительность.

Рабочий диапазон предложенного распределенного калориметрического дозиметра может быть пригоден для регистрации уровней ионизирующего излучения, характерных для ряда объектов атомной промышленности, в частности для атомных электростанций и хранилищ отработанного ядерного топлива, что проиллюстрировано в табл. 1 (Φ_γ – мощность дозы гамма-излучения, D_γ – полная доза гамма-излучения).

Таблица 1. Данные об уровнях радиационного облучения на объектах атомной промышленности [32]

Область применения	Уровень радиации
Активная зона реактора	$\Phi_\gamma \leq 10^7$ Гр/ч
Герметичная оболочка реактора	$D_\gamma \leq 5 \cdot 10^5$ Гр
Радиационно-защитная камера	$\Phi_\gamma \approx 0-10^4$ Гр/ч, $D_\gamma \approx 0-10^6$ Гр
Отработанное ядерное топливо	$\Phi_\gamma \approx 10^2-10^3$ Гр/ч, $D_\gamma \approx 10^6-10^7$ Гр

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлены предварительные результаты изучения нового типа датчика для распределенного мониторинга ионизирующего излучения – линейного калориметрического датчика, созданного в сотрудничестве с промышленным партнером. Численное моделирование, а также проведенные эксперименты по гамма-облучению позволили оценить эффективность, временные характеристики отклика и чувствительность датчиков в сравнении с конфигурациями точечного типа.

Показано, что линейные композитные датчики с вольфрамовыми поглощающими элементами обеспечивают чувствительность, сопоставимую с точечными датчиками, при одновременном улучшении механических характеристик. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности данной разработки в приложении к задачам мониторинга состояния строительных конструкций.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-72-10174.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Matta F., Bastianini F., Galati N., Casadei P., Nanni A.* J. Perform. Constr. Facil. 2008. V. 22. P. 264. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(2008\)22:4\(264\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2008)22:4(264))
2. *Minardo A., Bernini R., Amato L., Zeni L.* IEEE Sens. J. 2012. V. 12. P. 145. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2011.2141985>
3. *Regier R., Hoult N.A.* J. Bridge Eng. 2014. V. 19. P. 05014007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000637](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000637)
4. *Webb G.T., Vardanega P.J., Hoult N.A., Fidler P.R.A., Bennett P.J., Middleton C.R.* J. Bridge Eng. 2017. V. 22. P. 05017002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000996](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000996)
5. *De Battista N., Kechavarzi C., Cheal N., Harvey R., Wong S.* Proc. Int. Conf. Smart Infrastructure and Construction (ICSIC), Cambridge, UK, 2019. P. 233. <https://doi.org/10.1680/icsic.64669.233>
6. *Moser F., Lienhart W., Woschitz H., Schuller H.* J. Civ. Struct. Health Monit. 2016. V. 6. P. 321. <https://doi.org/10.1007/s13349-016-0172-9>

7. Klais F., Wolf P., Lienhart W. Geomech. Tunn. 2017. V. 10. P. 686.
<https://doi.org/10.1002/geot.201700052>
8. Feng X., Han Y., Wang Z., Liu H.J. Civ. Struct. Health Monit. 2018. V. 8. P. 509.
<https://doi.org/10.1007/s13349-018-0286-3>
9. Li Z., Soga K., Kechavarzi C. Géotech. Lett. 2018. V. 8. P. 171.
<https://doi.org/10.1680/jgele.18.00031>
10. Lienhart W., Buchmayer F., Klug F., Monsberger C.M. Proc. Int. Conf. Smart Infrastructure and Construction (ICSIC), Cambridge, UK. 2019. P. 595. <https://doi.org/10.1680/icsic.64669.595>
11. Buchmayer F., Monsberger C.M., Lienhart W. J. Appl. Geod. 2021. V. 15. P. 1.
<https://doi.org/10.1515/jag-2019-0065>
12. Kurashima T., Horiguchi T., Tateda M. Opt. Lett. 1990. V. 15. P. 1038.
<https://doi.org/10.1364/OL.15.001038> .
13. Galindez-Jamioy C.A., López-Higuera J.M. J. Sens. V. 2012. P. 204121.
<https://doi.org/10.1155/2012/204121>.
14. Lu P., Lalam N., Badar M. et al. Appl. Phys. Rev. V. 6. № 4. Art. ID 041302.
<https://doi.org/10.1063/1.5113955> .
15. Leal-Junior A., Soares da Silva J., Macedo L. et al. Sens. Diag. 2024.
<https://doi.org/10.1039/D4SD00032C> .
16. Justus B.L., Falkenstein P., Huston A.L. et al. Radiat. Prot. Dosim. 2006. V. 120. №1–4. P. 20.
<https://doi.org/10.1093/rpd/nci525>
17. Andersen C.E., Aznar M.C., Boetter-Jensen L. et al. Proc. Int. Symp. Standards and Codes of Practice in Medical Radiation Dosimetry. 2002. V. 2. P. 353.
18. Suchowerska N., Lambert J., Nakano T. et al. Radiat. Meas. 2007. V. 42. P. 929.
<https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2007.02.042>
19. Jang K.W., Cho D.H., Yoo W.J. et al. J. Korean Phys. Soc. 2010. V. 56. № 3. P. 765.
20. Bartesaghi G., Conti V., Bolognini D. et al. Methods Phys. Res. A. 2007. V. 581. P. 80.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.07.032>
21. Lee B., Jang K.W., Cho D.H. et al. Opt. Rev. 2007. V. 14. № 5. P. 351.
<https://doi.org/10.1007/s10043-007-0351-3>
22. Jones S.C., Sweet J.A., Braunlich P. et al. Radiat. Prot. Dosim. 1993. V. 47. P. 525.
23. Magne S., De Carlan L.-L., Sorel S. et al. Maestro project: Development of a multi-channel OSL dosimetric system for clinical use, Workshop on Dosimetric Issues in the Medical Use of Ionizing Radiation (EURADOS AM 2008), 2008.
24. Nishiura R., Izumi N. Radiation sensing system using an optical fiber, Mitsubishi Electric Advance. 2001. V. 95. P. 25.

25. Yukihiro E.G., Sawakuchi G.O., Guduru S. et al. Radiat. Meas. 2006. V. 41. P. 1126.
<https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2006.05.027>
26. Tregubov A.V., Prikhodko V.V., Alekseyev A.S. et al. IEEE Sensors Lett. 2022. V. 6. № 12. P. 3502904. <https://doi.org/10.1109/LENS.2022.3226869>.
27. Prikhodko V., Tregubov A., Alekseyev A., Pribylov M. Opt. Laser Technol. 2025. V. 181. P. ID 111688. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.111688>.
28. Tregubov A.V., Svetukhin V.V., Prikhodko V.V., Novikov S.G., Berintsev A.V. Results Phys. 2016. V. 6. P. 131. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2016.01.008>.
29. Kalamkarov A.L., Fitzgerald S.B., MacDonald D.O., Anastasis V. Georgiades A.V. Proceedings of SPIE. 1998. V. 3400. <https://doi.org/10.1117/12.300079>
30. Luna Innovations. Embedding Fiber in Composites Using Pultrusion, Technical Note. 2016. https://lunainc.com/sites/default/files/assets/files/resource-library/LT_TD_EN-FY1601_Embedding-Fiber-in-Composites.pdf.
31. Fernandez A., Brichard B., Alasia D., Abrardi L., Thevenaz L. Proc. SPIE. The International Society for Optical Engineering. 2005. <https://doi.org/10.1117/12.623703>
32. Berghmans F., Gusarov A. Fiber Bragg Grating Sensors: Recent Advancements, Industrial Applications and Market Exploitation. 2011. V. 1. P. 218. <https://doi.org/10.2174/978160805084011101010218>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Конструкция линейного калориметрического датчика (поперечное сечение): 1 – полимерная оболочка, 2 – нити-поглотители излучения, 3 – оптическое волокно
- Рис. 2.** Линейный калориметрический датчик в виде полимерной арматуры
- Рис. 3.** Калориметрический датчик точечного типа с тремя витками оптического волокна
- Рис. 4.** Результаты численного моделирования распределения температуры в объеме линейного калориметрического датчика при поглощении излучения вольфрамовыми проволоками
- Рис. 5.** Профиль температуры вдоль оптического волокна, полученный после 4 ч гамма-облучения мощностью 4.94 кГр/ч. Левый пик – линейный датчик, правый пик – датчик точечного типа
- Рис. 6.** Профили температуры вдоль линейного калориметрического датчика, полученные при гамма-облучении мощностью 4.94 кГр/ч с интервалом в 1 ч. Кривые, соответствующие облучению в течение 4 и 5 ч практически идентичны

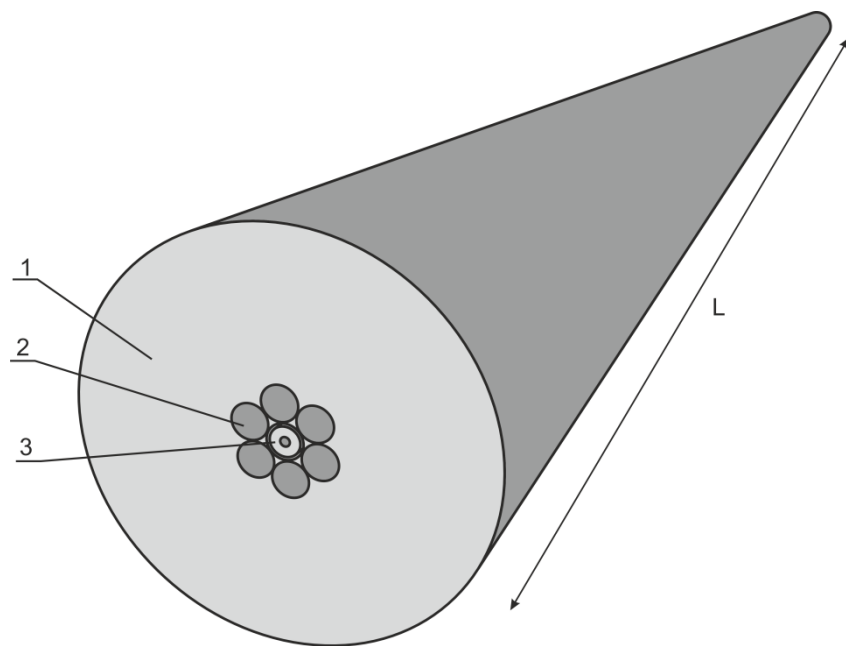


Рис. 1.



Рис. 2.

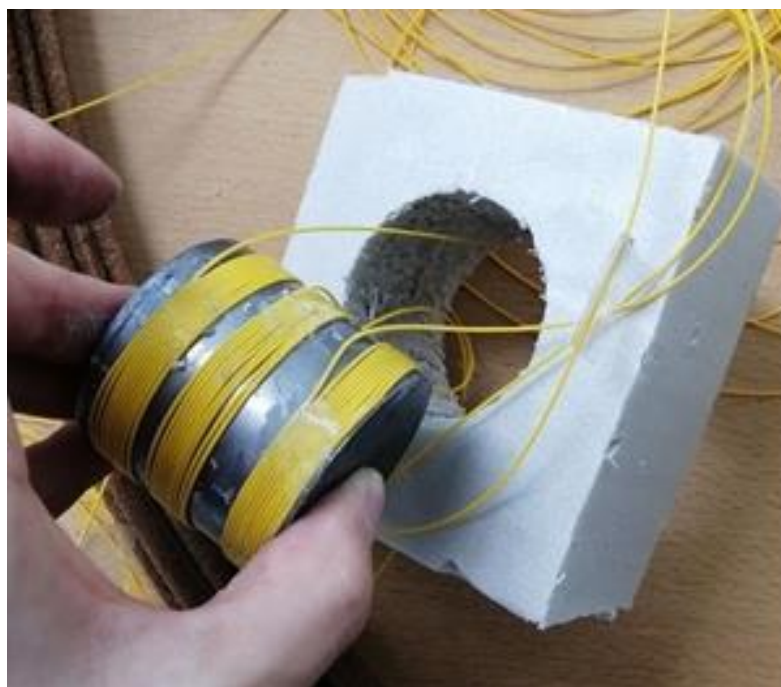


Рис. 3.

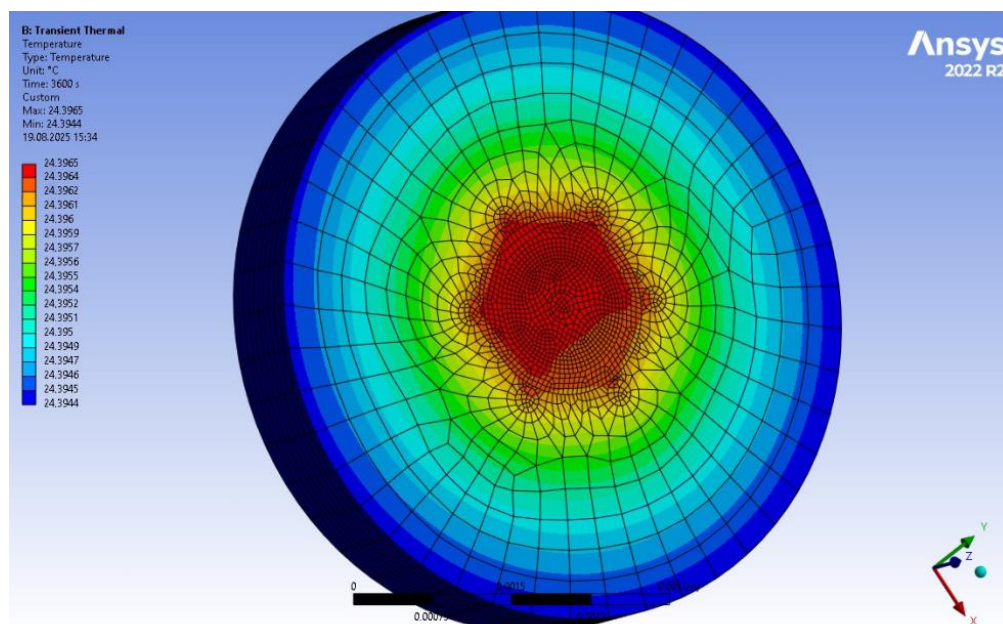


Рис. 4.

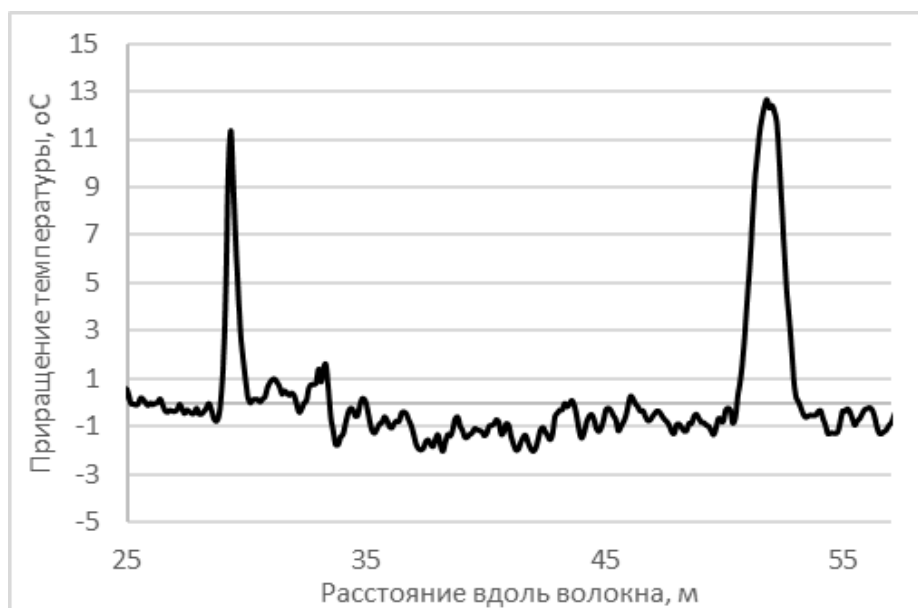


Рис. 5.

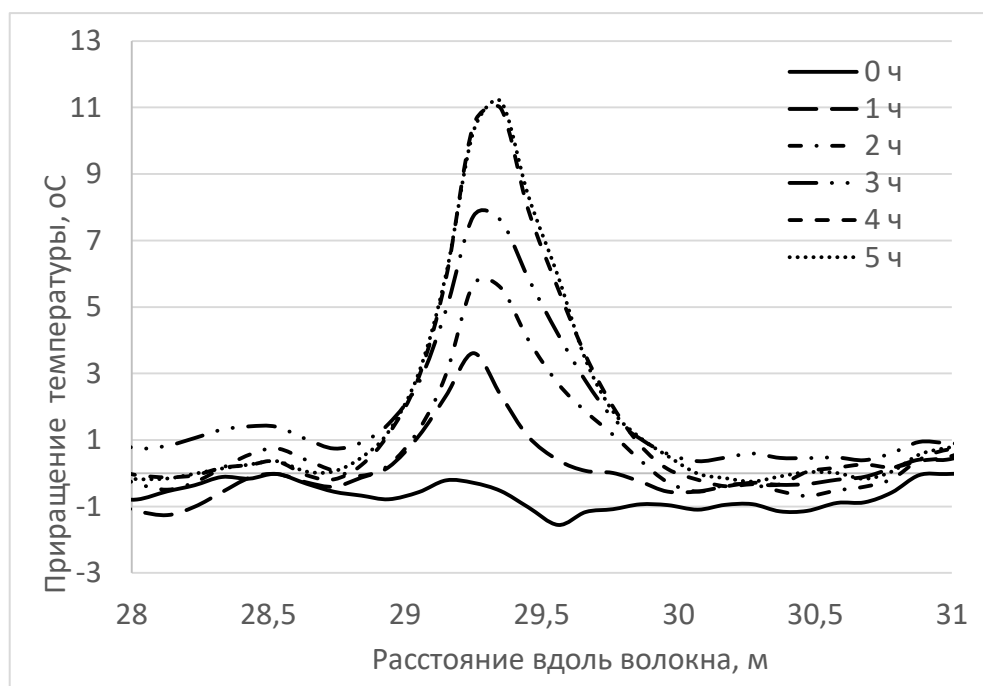


Рис. 6.