

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-04-105-114

УДК 681.586.5

Волоконно-оптический метод идентификации различных веществ по их тепловым характеристикам

Виктория Александровна Клишина¹✉, Сергей Владимирович Варжель²,
Барвара Александровна Куликова³

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

¹novivial@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5254-2133>

²vsv187@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>

³kulikova.varya2809@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-0457-4517>

Аннотация

Предмет исследования. Данная работа посвящена исследованию и разработке волоконно-оптического метода идентификации вещества по его тепловым характеристикам и определения фазы вещества в потоке газожидкостной смеси. **Цель работы.** Целью данной работы является разработка волоконно-оптического чувствительного элемента для идентификации вещества по его тепловым характеристикам с использованием стандартных телекоммуникационных волокон, имеющего единую компактную конструкцию и с осуществлением возможности проведения удалённых измерений. Также в работе требуется выполнение исследований динамических систем при сменяющихся фазах вещества с применением полностью волоконно-оптических технологий. **Метод или методология проведения работы.** Область нагрева была выполнена путём формирования структуры тейпера в оптическом волокне, а для измерений записывалась волоконная брэгговская решётка, выполняющая функцию датчика температуры. **Основные результаты.** В ходе исследований разработано новое научно-техническое решение по созданию волоконно-оптического чувствительного элемента для идентификации вещества по его тепловым характеристикам. Эксперименты были проведены для шести образцов с диапазоном удельной теплоёмкости 1,0–4,2 кДж/(кг К), по полученным результатам построены зависимости спектрального сдвига резонанса волоконной брэгговской решётки от значений удельных теплоёмкостей веществ, максимальное среднеквадратическое отклонение составило 0,0088 нм. Также представлены результаты по идентификации фазы газожидкостной смеси в движущихся потоках. **Практическая значимость.** Результаты работы представляют научный интерес для исследователей в областях, требующих анализа образцов с различными тепловыми характеристиками, определения смены состояния фазы в движущихся потоках, фиксации наличия примесей в потоках известных веществ, измерений уровня жидкостей и пр.

Ключевые слова: волоконная брэгговская решётка, метод горячей проволоки, волоконно-оптические датчики, идентификация различных веществ, измерение тепловых характеристик, измерение удельной теплоёмкости

Благодарность: работа выполнена при финансовой поддержке программы «Приоритет 2030».

Ссылка для цитирования: Клишина В.А., Варжель С.В., Куликова В.А. Волоконно-оптический метод идентификации различных веществ по их тепловым характеристикам // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 4. С. 105–114. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-04-105-114>

Коды OCIS: 060.3735, 060.2370, 120.0280, 120.6810.

Fiber-optic method for identification of various substances by their thermal characteristics

VICTORIA KLISHINA¹✉, SERGEY VARZHEL², VARVARA KULIKOVA³

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

¹novivial@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5254-2133>

²vsv187@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>

³kulikova.varya2809@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-0457-4517>

Abstract

Subject of study. This work is devoted to the research and development of a fiber-optic method for identifying a substance by its thermal characteristics and determining the phase of a substance in a gas-liquid mixture flow. **Aim of study.** The purpose of this work is to develop a fiber-optic sensing element with a single compact design and the possibility of remote measurements for identifying a substance by its thermal characteristics using standard telecommunication fibers. The work also requires studies of dynamic systems with the changing phases of matter using fully fiber-optic technologies. **Method.** The hot wire method with implementation of fiber optics elements is used in the work. The creation of the heating area was realized by forming the structure of the taper in the optical fiber, and for measurements, a fiber Bragg grating was formed, which acts as a temperature sensor. **Main results.** In the course of the work, a new scientific and technical solution was developed to create a fiber-optic sensitive element for identifying a substance by its thermal characteristics. The experiments were carried out for six samples with a specific heat capacity range of 1.0–4.2 kJ/(kg K), according to the results obtained, the dependences of the spectral shift of the resonance of the fiber Bragg grating on the values of the specific heat capacities of substances were plotted, the maximum standard deviation was 0.0088 nm. The results of identifying the phase of a gas-liquid mixture in moving flows are also presented. **Practical significance.** The results of the work are of scientific interest to researchers in areas requiring the analysis of samples with different thermal characteristics, determining the phase change in moving flows, detecting the presence of impurities in the flows of known substances, measuring the level of liquids, etc.

Keywords: fiber Bragg grating, hot wire method, fiber optic sensors, definition of various substances, measurement of thermal characteristics, specific heat capacity measurement

Acknowledgment: the work was carried out with the financial support of the Priority 2030 program.

For citation: Klishina V.A., Varzhel S.V., Kulikova V.A. Fiber-optic method for identification of various substances by their thermal characteristics // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 4. P. 105–114. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-04-105-114>

OCIS codes: 060.3735, 060.2370, 120.0280, 120.6810.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие оптических, а в частности, волоконно-оптических технологий позволило значительно расширить области исследований в различных сферах промышленности и достичь нового уровня технического и научно-технического прогресса. На сегодняшний день, измерительные устройства на основе оптических волокон находят широкое применение во множестве отраслей: медицина [1], строительство [2], авиа- и аэрокосмическая [3], газо- и нефтедобывающие отрасли [4, 5], гидро- электроэнергетика [6] и т.д. [7]. При этом

существуют универсальные устройства, применение которых необходимо одновременно в нескольких областях. К таким устройствам могут быть отнесены датчики по анализу тепловых характеристик веществ. Среди наиболее распространённых методов измерения таких величин выделяют метод горячей охранной зоны, метод теплового потока, цилиндрический, сравнительный, метод горячей проволоки, метод плоского источника, метод вспышки, трёхчастотный метод (3 ω -метод) и пр. [8]. Также в литературе выделены оптические методы, основанные на изучении отражения,

преломления и дифракции от нагретой области, а также функционирующие на базе инфракрасной тепловой радиометрии и исследованиях поверхностной деформации [9].

В большинстве случаев определение тепловых характеристик веществ возможно стационарными методами, то есть в лабораторных условиях с забором образца и его размещением в измерительной ёмкости, при этом динамических методов, при которых система работает удалённо, значительно меньше, а если это удаление составляет порядка нескольких сотен или тысяч метров — ещё меньше. Применение оптических волокон в таких системах позволяет решать ряд значительных проблем, связанных с необходимостью удалённого измерения, использованием в условиях электромагнитных помех, компактностью, быстрой скоростью отклика и т.д. Известны различные методы измерения тепловых характеристик веществ с применением оптических волокон. К ним относятся абсорбционный, основанный на анализе люминесцентного излучения, зависящего от тепловых характеристик веществ [10], интерферометр Маха–Цендера с внешним нагревателем [11], интерферометр Фабри–Перо с внутриволоконными нагревателями на основе высокопоглощающих волокон [12, 13], анализ теплообмена при конвекции с помощью волоконных дифракционных структур [14, 15], адаптация метода горячей проволоки с применением в качестве нагревателя длиннопериодной волоконной решётки Брэгга, а в качестве измерителя — стандартной волоконной брэгговской решётки [16, 17]. К основным недостаткам данных работ можно отнести следующие: использование внешнего электрического нагревателя [11], усложняющего конструкцию чувствительного элемента и требующего статичности её закрепления, использование специализированных дорогостоящих видов волокон (легированных специальными элементами) [12, 13], возможность реализации только в лабораторных условиях [14, 15], использование единого волокна как в качестве нагревателя, так и в качестве информационного канала [16, 17].

Исходя из перечисленных выше недостатков и анализируя связанные с ними ограничения, необходима разработка нового научно-технического подхода к созданию устройства, включающего все преимущества использова-

ния волоконно-оптических технологий и не имеющего внешнего электрического нагрева, а также без использования специализированных волокон и с возможностью осуществления удалённых измерений. Таким образом, данная работа посвящена решению задачи определения вещества по его тепловым характеристикам, кроме того, дополнительной задачей в работе является исследование применимости разработанного метода для определения фазы вещества в движущемся потоке газожидкостной смеси.

Целью данной работы является разработка волоконно-оптического чувствительного элемента для идентификации вещества по его тепловым характеристикам с использованием стандартных телекоммуникационных волокон, имеющего единую компактную конструкцию и с реализацией возможности проведения удалённых измерений. Также в работе требуется проведение исследований динамических систем при сменяющихся фазах вещества с применением полностью волоконно-оптических технологий.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Одним из перспективных контактных методов с возможностью удалённого измерения является исследование тепловых характеристик с полным или частичным применением принципов метода горячей проволоки. Стандартная реализация такого метода подразумевает использование металлической проволоки, размещённой в исследуемом образце, на которую подаётся электрический ток, вызывающий нагрев как самой проволоки, так и вещества вокруг неё в результате теплообмена. При рассмотрении таких тепловых характеристик, как теплопроводность, удельная (то есть нормированная на единицу массы) теплоёмкость и температуропроводность, связь между ними определяется следующей формулой:

$$D = \frac{k}{\rho c},$$

где D — коэффициент температуропроводности, k — коэффициент теплопроводности, ρ — плотность материала, c — удельная теплоёмкость.

К недостаткам металлической проволоки, используемой в таком методе измерений, относятся высокая восприимчивость к электромагнитным помехам, которые напрямую влияют на измерения и искажают их, а также процессы коррозии и окисления. В данной работе металлическая нить была заменена на оптическое волокно (ОВ), что позволило исключить описанные недостатки.

Разработанный чувствительный элемент состоит из двух оптических волокон, одно из которых используется как нагреватель, а другое — как измеритель температуры. Конструкция чувствительного элемента представлена на рис. 1 (все размеры, приведённые на рисунке, условны).

Для формирования нагревательного элемента многомодовое оптическое волокно ClearCurve 50/125 укладывалось в сварочный аппарат Fujikura FSM-100P, в котором создавалась область перетяжки (иначе называемое волокно с конусной структурой или тейпер) с диаметром в самой узкой части порядка 15 мкм. Изменение геометрии волокна в области сужающейся части при прохождении излучения приводит к его выведению из сердцевины ОВ во внешнюю среду, при этом в работе применяется многомодовое волокно, преимуществом которого является возможность работы с высокомоушным излучением. В качестве измерителя температуры используется одно-

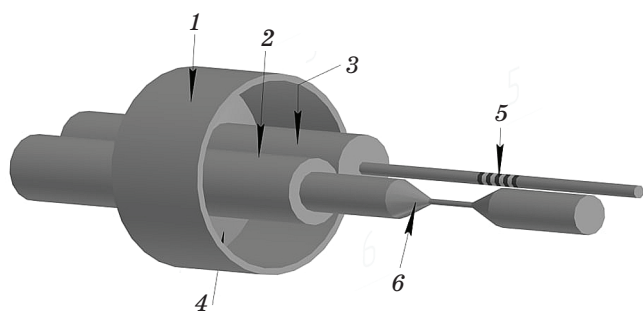


Рис. 1. Волоконно-оптический чувствительный элемент для измерений тепловых характеристик различных веществ (1 — стальная трубка, 2 — многомодовое ОВ, 3 — одномодовое ОВ, 4 — фиксирующее соединение, 5 — ВБР, 6 — тейпер)

Fig. 1. Fiber-optic sensitive element for measuring the thermal characteristics of various substances (1 — steel tube, 2 — multimode optical fiber, 3 — single-mode optical fiber, 4 — fixing connection, 5 — FBG, 6 — taper)

модовое оптическое волокно SMF-28 со сформированной в нём волоконной брэгговской решёткой (ВБР). Запись такой структуры осуществлялась интерферометрическим методом [18, 19], а в качестве источника излучения использовалась KrF-эксимерная лазерная система Optosystems CL-7550 типа задающий генератор — усилитель. Далее оба волокна совмещаются друг с другом таким образом, чтобы область с ВБР располагалась напротив области тейпера, затем они жёстко фиксировались с помощью клея в стальной трубке с внешним диаметром 800 мкм и длиной порядка 10 мм.

Принцип работы устройств на основе ВБР заключается в следующем: излучение, распространяющееся по световоду, достигая такой структуры, претерпевает отражение на длине волны брэгговского резонанса, зависящей от периода такой структуры и эффективного показателя преломления сердцевины волокна для центральной длины волны. При изменении температуры происходит изменение обоих перечисленных параметров, в результате чего длина волны Брэгга смещается и по такому сдвигу возможно оценить изменение температуры.

На рис. 2 представлена схема проведения экспериментов по анализу одной из тепловых характеристик веществ, а именно, удельной теплоёмкости. В чаше Петри с диаметром 9 см

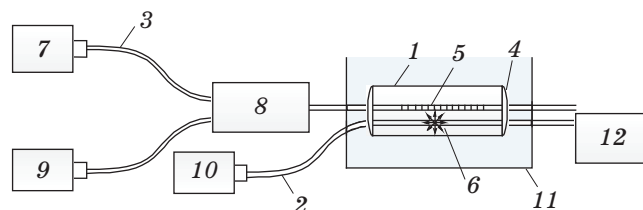


Рис. 2. Схема проведения экспериментов по измерению тепловых характеристик различных веществ (1 — стальная трубка, 2 — многомодовое ОВ, 3 — одномодовое ОВ, 4 — фиксирующее соединение, 5 — ВБР, 6 — тейпер, 7 — широкополосный источник излучения, 8 — у-ответвитель, 9 — интеррогатор, 10 — лазер накачки, 11 — чаша Петри с исследуемым образцом, 12 — измеритель мощности)

Fig. 2. Scheme of experiments on measuring the thermal characteristics of various substances (1 — steel tube, 2 — multimode optical fiber, 3 — single-mode optical fiber, 4 — fixing connection, 5 — FBG, 6 — taper, 7 — broadband radiation source, 8 — y-coupler, 9 — interrogator, 10 — pump laser, 11 — Petri dish with the test sample, 12 — power meter)

и высотой 1,5 см, наполненной исследуемым веществом, закреплялся разработанный чувствительный элемент таким образом, чтобы его грани не касались граней чаши, при этом чувствительный элемент был полностью погружен в образец.

Излучение от широкополосного источника по оптическому волокну достигает ВБР, отражаясь от которой направляется на интеррогатор Ibsen Photonics I-MON 256 USB. Второе волокно (многомодовое) с тейпером, используемое для вывода оптического излучения из сердцевины волокна, подключено напрямую к волоконному лазеру накачки, генерирующему излучение на длине волны 1080 нм, а с другой стороны волокно подключено к измерителю мощности. Также возможна реализация схемы с добавлением второго многомодового оптического волокна с тейпером, сваренного со свободным концом первого. В таком случае два волокна с областями тейперов располагаются друг напротив друга и напротив третьего волокна с ВБР, весь элемент с тремя волокнами жёстко фиксируется в стальной трубке. Таким образом, излучение лазера накачки, которое не вывелось на первом тейпере, распространяется дальше по волокну, доходя до второго тейпера.

В отличие от способа, реализованного в работах [16, 17], используемая конструкция нагревателя в виде тейпера (а именно, изме-

нённой геометрии волокна) вместо дифракционной структуры позволила достичь важного преимущества. Реализация нагревателя на основе тейпера исключает необходимость перестройки оборудования под резонансную длину волны выводящего элемента, что обеспечивает надёжность и стабильность работы при изменяющихся внешних условиях.

При создании области горячей проволоки, то есть при запуске лазера накачки и выведении его излучения из сердцевины оптического волокна во внешнюю среду, весь чувствительный элемент и область вокруг него с исследуемым образцом нагревается. При этом величина нагрева регистрируется путём анализа сдвига длины волны брэгговского резонанса и зависит от тепловых характеристик веществ. Таким образом, при одной и той же мощности лазера накачки в веществах с различными тепловыми характеристиками чувствительный элемент будет нагреваться по-разному, а мониторинг сдвига длины волны брэгговского резонанса позволит анализировать тепловые характеристики (в данной работе исследовалась удельная теплоёмкость).

Во второй части работы были проведены исследования по анализу присутствия в движущихся потоках одного вещества примесей другого. В данной работе изучалось наличие воздуха в потоке воды. На рис. 3 представлена

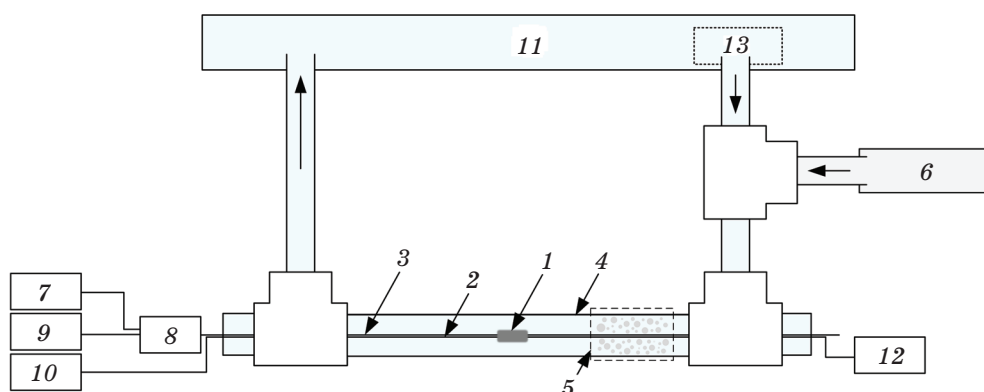


Рис. 3. Экспериментальная установка для проведения экспериментов по идентификации различных веществ в проходящем потоке (1 — чувствительный элемент в стальной трубке, 2 — многомодовое ОВ, 3 — одномодовое ОВ, 4 — внешняя трубка, 5 — область с газожидкостной смесью, 6 — воздушный насос, 7 — широкополосный источник излучения, 8 — y -ответвитель, 9 — интеррогатор, 10 — лазер накачки, 11 — ёмкость с водой, 12 — измеритель мощности, 13 — водный насос)

Fig. 3. Experimental setup for carrying out experiments on the identification of various substances in a passing stream (1 — sensitive element in the steel tube, 2 — multimode optical fiber, 3 — single-mode optical fiber, 4 — outer tube, 5 — gas-liquid mixture, 6 — air pump, 7 — broadband radiation source, 8 — y -coupler, 9 — interrogator, 10 — pump laser, 11 — water tank, 12 — power meter, 13 — water pump)

схема проведения экспериментов по идентификации различных веществ в потоке газожидкостной смеси (смеси воды и воздуха).

Схема опроса чувствительного элемента в данном эксперименте совпадала со схемой, показанной на рис. 2. При этом была выполнена следующая модификация: волокна с чувствительным элементом жёстко фиксировались в горизонтальной трубке с внутренним диаметром 8 мм, а по бокам через тройники подключалось два вывода трубки. При этом к одному выводу подсоединялись через ещё один тройник два насоса — воздушный с одной стороны и водный с другой, а второй вывод трубки фиксировался в ёмкости с водой для создания замкнутой системы накачки. В ходе экспериментов при постоянной скорости через трубу прокачивался поток воды, а в определённые моменты времени с помощью воздушного насоса добавлялся либо воздух, либо смесь вода/воздух (газожидкостная смесь). Необходимо учитывать, что прокачка воздуха осуществлялась в ручном режиме, в результате чего соотношение вода/воздух было непостоянным.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Первая часть экспериментов проводилась при погружении чувствительного элемента в исследуемые образцы с заранее известным значением удельной теплоёмкости, которая была предварительно измерена с помощью аналитического комплекса на базе дифференциальной сканирующей калориметрии теплового потока DSC 204 F1 Phoenix, NETZSCH-Geratebau GmbH. В качестве исследуемых образцов использовались следующие вещества (расположены по мере возрастания удельной теплоёмкости): воздух, жидкий силикон, жидкий парафин, растительное масло, этиленгликоль, вода. Температура исследуемых веществ колебалась в диапазоне 23–24 °C и фиксировалась для каждого образца перед началом измерений. Для анализа удельной теплоёмкости чувствительный элемент (рис. 1) погружался в исследуемый образец и по схеме на рис. 2 проводились измерения сдвига длины волны брэгговского резонанса при одной и той же мощности излучения лазера накачки. На рис. 4 представлены измерения сдвига длины волны брэгговского резонанса для образцов с различной удельной теплоёмкостью.

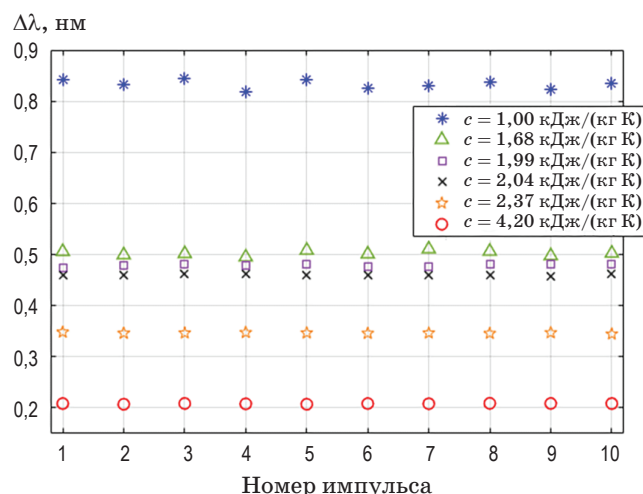


Рис. 4. Результаты экспериментов по анализу сдвига длины волны брэгговского резонанса для образцов с различными тепловыми характеристиками (удельной теплоёмкостью)

Fig. 4. Results of experiments on the analysis of the Bragg resonance wavelength shift for samples with different thermal characteristics (specific heat capacity)

Для каждого образца было подано 10 последовательных импульсов лазера накачки с частотой 0,2 Гц и длительностью импульса 1 с, мощность импульса составляла порядка 240 мВт. Значение $\Delta\lambda$ вычислялось как разность между максимальным значением λ_i после подачи импульса i и минимальным значением λ_{i-1} перед подачей импульса (т.е. минимального значения λ между импульсами i и $i-1$).

По полученным данным были рассчитаны среднее арифметическое и среднее квадратическое отклонение (СКО) от $\Delta\lambda$ для каждого вещества по 10 импульсам, представленным на рис. 4. Результаты показаны в табл. 1.

На рис. 5 продемонстрирована зависимость сдвига длины волны брэгговского резонанса от удельной теплоёмкости веществ (жидкостей и газов), построенная по средним арифметическим значениям из табл. 1.

По данным, представленным в табл. 1 и на рис. 5, можно сделать вывод о точности разработанного метода и предложенной конструкции чувствительного элемента, для которых СКО сдвига длины волны брэгговского резонанса не превышает значения 0,0088 нм в диапазоне удельных теплоёмкостей 1,0–4,2 кДж/(кг К).

Таким образом, продемонстрирована работоспособность описанной методики в условиях измерения веществ в статичном состоянии.

Следующим этапом работы была задача определения веществ в потоке газожидкостной смеси, имеющих различные тепловые характеристики. Для однозначной интерпретации исследовались вода и воздух, так как они имели максимальную разницу удельных теплоёмкостей среди всех исследуемых в работе веществ.

Эксперименты проводились на испытательном стенде, показанном на рис. 3. Сначала включался лазер накачки (режим генера-

ции — непрерывный), и в стоячей воде происходил нагрев чувствительного элемента и области вокруг него. Далее в трубе с помощью насоса создавался постоянный поток воды и каждые 30 с с помощью воздушного насоса прокачивался воздух и/или смесь вода/воздух. Последовательность проведения эксперимента представлена в табл. 2.

Экспериментальные результаты, полученные в ходе работы, показаны на рис. 6.

Информация, продемонстрированная в табл. 2, описана путём видеофиксации хода проведе-

Таблица 1. Расчёт среднего арифметического и СКО по экспериментальным данным

Table 1. Calculation of the arithmetic mean and standard deviation from experimental data

Удельная теплоёмкость вещества, кДж/(кг К)	Среднее арифметическое $\Delta\lambda$, нм	СКО $\Delta\lambda$, нм
1,00	0,8327	0,0088
1,68	0,5028	0,0050
1,99	0,4788	0,0028
2,04	0,4605	0,0013
2,37	0,3465	0,0010
4,20	0,2083	0,0006

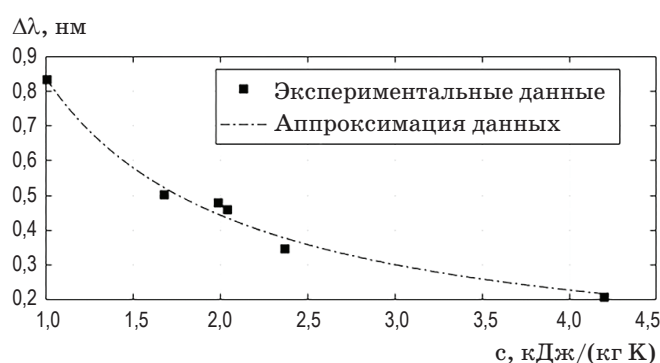


Рис. 5. Зависимость сдвига длины волны брэгговского резонанса от удельной теплоёмкости веществ (жидкостей и газов)

Fig. 5. Dependence of the Bragg resonance wavelength shift on the specific heat capacity of substances (liquids and gases)

Таблица 2. Последовательность проведения эксперимента

Table 2. Sequence of the experiment

Время*	Описание эксперимента
00:10:00	Включение генерации лазера накачки в непрерывном режиме
00:30:00–00:34:00	Установление постоянной скорости потока воды
00:50:00–00:52:00	Прохождение смеси вода/воздух
01:20:00–01:21:00	Прохождение смеси воздуха
01:21:00–01:24:00	Прохождение смеси вода/воздух
01:51:00–01:52:00	Прохождение смеси вода/воздух (больше воздуха)
02:20:00–02:21:00	Прохождение смеси вода/воздух (больше воздуха)
02:25:00–02:26:00	Прохождение смеси вода/воздух
02:51:00–02:52:00	Прохождение смеси вода/воздух
03:20:00–03:22:00	Прохождение смеси вода/воздух (больше воздуха)
03:24:00–03:30:00	Прохождение смеси вода/воздух
03:51:00–03:53:00	Прохождение смеси вода/воздух

* В промежутках времени, не указанных в данном столбце, было реализовано движение потока воды с постоянной заданной скоростью.

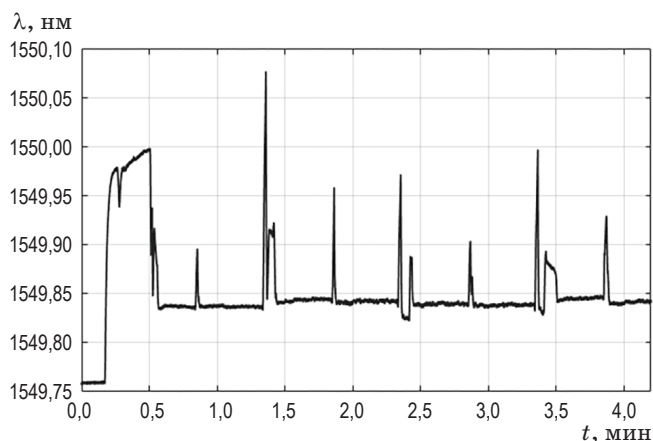


Рис. 6. Результаты экспериментов по измерению длины волны брэгговского резонанса при движении потоков газожидкостной смеси

Fig. 6. Results of experiments on measuring the wavelength of the Bragg resonance during the motion of flows of a gas-liquid mixture

ния эксперимента. Данные на протяжении более 4 мин регистрировались с помощью интеррогатора с частотой 952,4 Гц. Наибольшие «всплески» на рис. 6 наблюдаются в моменты, когда в составе проходящей газожидкостной смеси преобладает воздух (либо полностью проходит только воздух), что связано с тем, что теплоёмкость воздуха меньше, чем воды, ввиду чего чувствительный элемент достаточно быстро нагревается до более высоких температур. Как указано в табл. 2, первые 30 с происходил нагрев чувствительного элемента в стоячей воде, а далее устанавливалась постоянная скорость потока воды, поэтому λ уменьшалась до значений, порядка 1549,84 нм. Небольшие колебания были связаны с тем, что каждый раз после прохождения газожидкостной смеси установившееся значение скорости потока могло несколько отличаться от предыдущего, порядка сотых м/с, что и влияло на значения λ . Подробнее о зависимости длины волны брэгговского резонанса от скорости потока было описано нами в работе [20].

Таким образом, из данных графика видно, что разработанное научно-техническое решение по созданию чувствительного элемента является надёжным методом определения вещества в проходящем потоке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате данной работы был разработан чувствительный элемент, решающий задачу идентификации веществ с различными тепловыми характеристиками (анализ проводился для различных значений удельной теплоёмкости). Также в работе было проведено исследование возможностей определения фазы вещества в потоке газожидкостной смеси. Диапазон измеряемых удельных теплоёмкостей составил 1,0–4,2 кДж/(кг К). Полностью волоконно-оптическая конструкция чувствительного элемента обладает такими преимуществами как возможность эксплуатации в условиях высоких температур, давлений и использования в условиях электромагнитных помех, что позволяет использовать их в областях, измерения в которых затруднительны или не реализуемы для стандартных существующих методов.

Результаты работы носят прикладной характер и могут быть использованы в различных областях промышленности для решения целого ряда задач: определение смены состояния фазы путём анализа удельной теплоёмкости исследуемого вещества, определение смены состояния фазы в движущихся потоках и наличия примесей в потоках известных веществ, определение уровня жидкостей и пр. При этом использование стандартных телекоммуникационных волокон, разработка единой компактной конструкции и высокая скорость отклика на внешние изменяющиеся условия позволяют использовать предложенный чувствительный элемент для создания устройств с возможностью удалённого мониторинга состояния движущихся потоков газожидкостных смесей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Carmo J.P., Ribeiro J.E. Optical fibers on medical instrumentation: A review // *International Journal of Biomedical and Clinical Engineering*. 2013. V. 2. № 2. P. 23–26. <https://doi.org/10.4018/ijbce.2013070103>
2. Leung C.K.Y., Wan K.T., Inaudi D., Bao X., Habel W., Zhou Z., Ou J., Ghandehari M., Wu H.C., Imai M. Review: Optical fiber sensors for civil engineering applications // *Materials and Structures*. 2013. V. 48. P. 871–906. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0201-7>

3. Garg A., Linda R.I., Chowdhury T. Application of fiber optics in aircraft control system & its development // 2014 International Conference on Electronics and Communication Systems. 2014. Coimbatore, India. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ECS.2014.6892703>
4. Edouard M.N., Okere C.J., Dong P., Ejike C.E., Emmanuel N.N., Muchiri N.D. Application of fiber optics in oil and gas field development — a review // Arabian Journal of Geosciences. 2022. V. 15. № 3. Article 539. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09659-2>
5. Islam A., Yuan M., Biwei W., Frode H., Bukham-sin A.Y., Ng T.K., Ooi B.S. A review of distributed fiber-optic sensing in the oil and gas industry // Journal of Lightwave Technology. 2022. V. 40. № 5. P. 1407–1431. <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3135653>
6. Chen W., Wang J., Wan F., Wang P. Review of optical fibre sensors for electrical equipment characteristic state parameters detection // High Voltage. 2019. V. 4. № 4. P. 271–281. <https://doi.org/10.1049/hve.2019.0157>
7. Elsherif M., Salih A., Muñoz M., Alam F., Alqattan B., Parkavan D., Zaki M., Yetisen A., Park S., Wilkinson T., Butt H. Optical fiber sensors: Working principle // Applications, and Limitations, Advanced Photonics Research. 2022. V. 3. № 2100371. P. 1–23. <https://doi.org/10.1002/adpr.202100371>
8. Yüksel N. The review of some commonly used methods and techniques to measure the thermal conductivity of insulation materials // Insulation Materials in Context of Sustainability. 2016. № 8. <https://doi.org/10.5772/64157>
9. Park H.K., Grigoropoulos C.P., Tam A.C. Optical measurements of thermal diffusivity of a material // International Journal of Thermophysics. 1995. V. 16. P. 973–995. <https://doi.org/10.1007/BF02093477>
10. Phillips S.R. Fiber optic thermal anemometer // Patent US4621929A. 1986.
11. White B.J., Davis J.P., Bobb L.C., Larson D.C. An optical fiber thermal conductivity sensor // Optical Fiber Sensors. 1988. V. 2. Paper FFF5. <https://doi.org/10.1364/OFS.1988.FFF5>
12. Pevec S., Donlagic D. Multiparameter fiber-optic sensor for simultaneous measurement of thermal conductivity, pressure, refractive index, and temperature // IEEE Photonics Journal. 2017. V. 9. № 1. P. 1–14. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2017.2651978>
13. Matjasec Z., Donlagic D. All-optical, all-fiber, thermal conductivity sensor for identification and characterization of fluids // Sensors and Actuators B: Chemical. 2017. V. 242. P. 577–585. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.11.084>
14. Lazaro R., Frizera-Neto A., Marques C., Castellani C.E.S., Leal-Junior A. FBG-based sensor for the assessment of heat transfer rate of liquids in a forced convective environment // Sensors. 2021. V. 21. № 20. P. 1–13. <https://doi.org/10.3390/s21206922>
15. Lazaro R.C., Marques C., Castellani C.E.S., Leal-Junior A. FBG-based measurement systems for density, specific heat capacity and thermal conductivity assessment for liquids // IEEE Sensors Journal. 2021. V. 21. № 6. P. 7657–7664. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3049574>
16. Silva G.E., Caldas P., Santos J.L., Santos J.C. All-fiber sensor based on a metallic coated hybrid LPG-FBG structure for thermal characterization of materials // Proceedings of SPIE. 2014. V. 9157. № 6. Paper 91571R. <https://doi.org/10.1117/12.2059655>
17. Silva G.E., Caldas P., Santos J.L., Santos J.C. Measurement thermal conductivity of water using a all-fiber sensor based on a metallic coated hybrid LPG-FBG structure // 26th International Conference on Optical Fiber Sensors. OSA Technical Digest. 24–28 September. 2018. Lausanne. Switzerland. Paper WF38. <https://doi.org/10.1364/OFS.2018.WF38>
18. Stam A.M., Idrisov R.F., Gribaev A.I., Varzhel S.V., Konnov K.A., Slozhenikina Yu.I. Fiber Bragg gratings inscription using Talbot interferometer and KrF excimer laser system // Journal of Instrument Engineering. 2017. V. 60. № 5. P. 466–473. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2017-60-5-466-473>
19. Gribaev A.I., Pavlishin I.V., Stam A.M., Idrisov R.F., Varzhel S.V., Konnov K.A. Laboratory setup for fiber Bragg gratings inscription used on Talbot interferometer // Opt Quant Electron. 2016. V. 48. P. 1–7. <https://doi.org/10.1007/s11082-016-0816-3>
20. Klishina V.A., Varzhel S.V., Loseva E.A. Method for simultaneous measurement of velocity and direction of fluid flow using fiber Bragg gratings // Optical Fiber Technology. 2023. V. 75. № 1. 103215. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.103215>

АВТОРЫ

Виктория Александровна Клишина — инженер, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57202829251, <http://orcid.org/0000-0001-5254-2133>, novivial@mail.ru

AUTHORS

Victoria A. Klishina — Engineer, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 57202829251, <http://orcid.org/0000-0001-5254-2133>, novivial@mail.ru

Сергей Владимирович Варжель — канд. физ.-мат. наук, доцент, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 55247304200, <http://orcid.org/0000-0002-3120-8109>, svvarzhel@itmo.ru

Варвара Александровна Куликова — инженер, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57997721300, <http://orcid.org/0000-0002-0457-4517>, kulikova_va@itmo.ru

*Статья поступила в редакцию 27.01.2023
Одобрена после рецензирования 08.02.2023
Принята к печати 27.02.2023*

Sergey V. Varzhel — PhD in Physics and Mathematics, Docent, Head of laboratory, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 55247304200, <http://orcid.org/0000-0002-3120-8109>, svvarzhel@itmo.ru

Varvara A. Kulikova — Engineer, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 57997721300, <http://orcid.org/0000-0002-0457-4517>, kulikova_va@itmo.ru

*The article was submitted to the editorial office 27.01.2023
Approved after review 08.02.2023
Accepted for publication 27.02.2023*