

09.5

Датчик скорости потока жидкости на основе волоконных брэгговских решеток с индукционным нагревом

© А.В. Умнова, А.С. Алейник, В.Е. Стригалева, В.А. Новикова, А.Н. Аширов

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: aumnova@itmo.ru

Поступило в Редакцию 8 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 19 мая 2021 г.

Принято к публикации 22 мая 2021 г.

Представлены результаты моделирования и экспериментальные данные работы датчика скорости потока с индукционным нагревом, где в качестве чувствительных элементов выступают волоконные брэгговские решетки. Принцип работы представленного датчика скорости потока основан на методе взаимной корреляции. В ходе эксперимента удалось детектировать время прохода теплового импульса между датчиками температуры от 0.2 до 0.5 с, что соответствует скорости потока в диапазоне 0.1–0.5 м/с.

Ключевые слова: датчик скорости потока, волоконная оптика, волоконные брэгговские решетки, анемометр, метод взаимной корреляции.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.17.51381.18816

В последнее время в литературе часто упоминаются датчики скорости потока жидкости или газа, где в роли чувствительных элементов выступают волоконные брэгговские решетки (ВБР), они могут выполнять роль термометра [1,2] или тензометра [3,4] в зависимости от выбранного принципа работы. Датчики скорости потока, в том числе термоанемометры, нашли широкое применение во многих отраслях промышленности, так как не имеют подвижных частей, обладают миниатюрным размером и имеют достаточно простую конструкцию: простейший термоанемометр состоит из нагревателя и термометра. В термоанемометрах на основе ВБР часто не используется электрический нагреватель, нагрев в таком случае происходит за счет излучения лазера накачки, и есть множество способов выведения излучения из сердцевины оптического волокна с целью нагрева области вокруг него [5,6]. Большинство таких анемометров предназначено для измерения скорости воздушного потока, так как мощности в несколько сотен милливатт достаточно для того, чтобы нагреть волокно, находящееся в воздушной среде, до относительно высоких температур. В ходе аналитического обзора были изучены работы [1,7], в которых авторам удалось создать датчик скорости потока жидкости с оптическим нагревом. Однако для увеличения чувствительности датчика необходимо увеличивать мощность нагрева, поэтому в датчиках скорости потока жидкости предпочтительно использовать электрические способы нагрева.

В настоящей работе описан датчик скорости потока жидкости на основе ВБР с индукционным нагревом. Плюсом индукционного нагрева является возможность бесконтактного нагрева необходимого участка проводника. При анализе литературы информации о подобных датчиках с использованием ВБР и индукционного нагрева обнаружено не было. Известно устройство определе-

ния бокового потока и направления движения флюида в скважине [8], в котором используется индукционный нагрев, но в качестве датчиков температуры в данном устройстве используются термодатчики, которые уступают в чувствительности датчикам на основе ВБР. Кроме того, в данном устройстве происходит нагрев всего корпуса, что вносит искажения в тепловое поле флюида.

Принцип работы предложенного датчика скорости потока жидкости построен на основе метода взаимной корреляции для определения скорости потока газа или жидкости. Метод заключается в определении времени, за которое некоторый „маркер“ проходит известное расстояние между двумя датчиками, которые его детектируют. В предложенном датчике в качестве „маркера“ используется тепловой импульс, по времени прохода теплового импульса от одного датчика температуры до другого определяется скорость. Время прохода теплового импульса между двумя датчиками определяется при помощи функции взаимной корреляции

$$f(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} T_1(t)T_2(t + \tau)dt, \quad (1)$$

где $T_1(t)$ — сигнал с термодатчика 1, $T_2(t + \tau)$ — сигнал с термодатчика 2.

Значение τ , при котором функция взаимной корреляции f достигает максимума, является временем задержки одного сигнала относительно другого, что соответствует времени, за которое тепловой импульс проходит расстояние между датчиками. Предложенный метод позволяет определять малые значения скорости — порядка нескольких миллиметров в секунду [9]. Также данный метод позволяет определять скорость жидкости, не привязываясь к характеристикам конкретного вещества, так как в идеальном случае передача тепла

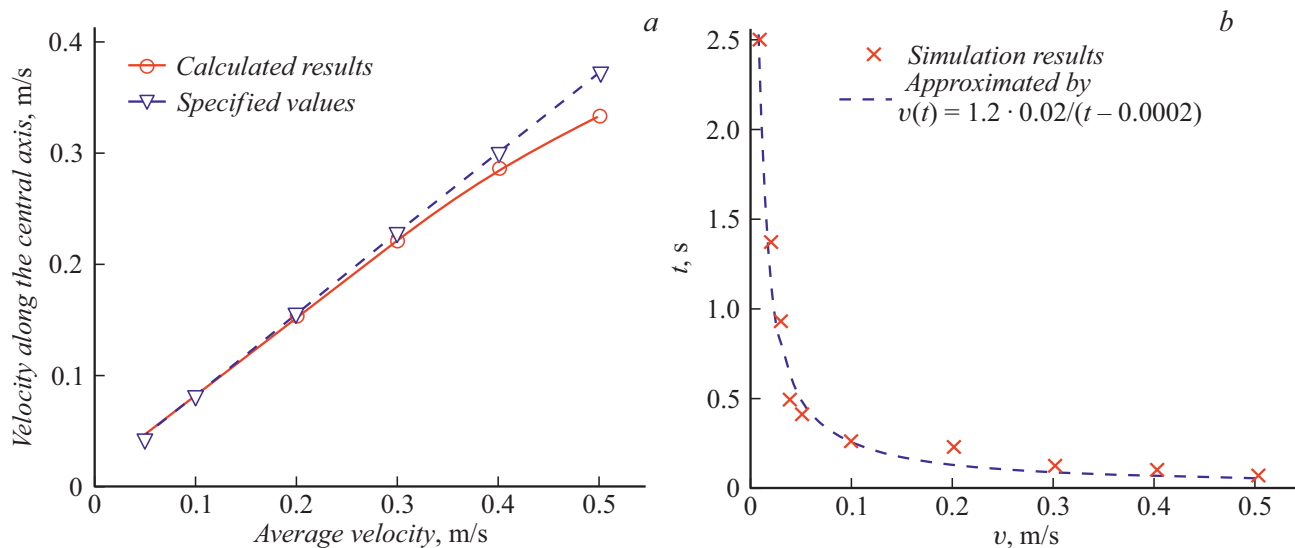


Рис. 1. Результаты моделирования датчика скорости потока жидкости. *a* — зависимость скорости потока вдоль центральной оси от средней скорости потока; *b* — зависимость времени прохода импульса от средней скорости потока.

происходит преимущественно из-за движения жидкости, а вклад свободной конвекции считается незначительным. Таким образом, данный подход делает возможным измерение скорости потока жидкости или газа с неизвестным заранее или сложным составом.

Предложенный принцип работы был смоделирован в специальном программном пакете, использующем для расчета метод конечных элементов. Была построена упрощенная модель датчика, где нагревателем выступал стальной шар, расположенный в центре трубки с водой. Значения температуры измерялись на расстоянии 1 и 3 см от центра нагревателя. Была вычислена функция взаимной корреляции для данных сигналов и рассчитана скорость потока. Рассчитанная скорость отличается от средней скорости потока из-за неравномерного распределения скоростей по диаметру трубки. На рис. 1, *a* представлен график скорости, рассчитанной методом взаимной корреляции, для сравнения штриховой линией показан график заданного значения скорости вдоль центральной оси. Из представленной зависимости видно, что точность определения падает с увеличением скорости. В представленном моделировании данные записывались с частотой 100 Hz, для увеличения точности необходимо увеличивать частоту снятия отсчетов.

Далее была построена модель предложенного датчика скорости потока жидкости, который представляет собой металлический микрокабель со встроенными датчиками температуры, помещенный в поток воды внутри пластиковой трубки. В данном случае на скорость распространения теплового импульса будут оказывать влияние теплопроводность микрокабеля и коэффициент перевода скорости распространения теплового импульса в скорость потока жидкости, изменяющийся из-за неравномерного распределения скоростей по диаметру трубки. Таким образом, зависимость скорости потока от

времени прохода теплового импульса между датчиками выглядит следующим образом:

$$v(t) = k \frac{d}{t + a}, \quad (2)$$

где k — коэффициент, связывающий среднюю скорость потока с расчетной, a — коэффициент, характеризующий время распространения тепла между датчиками при свободной конвекции (без потока), d — расстояние между термодатчиками, t — время прохода импульса между датчиками.

Полученные в ходе моделирования данные были аппроксимированы функцией $v(t)$, результат представлен на рис. 1, *b*. Разброс точек на графике относительно аппроксимирующей функции объясняется наличием погрешности при моделировании методом конечных элементов. На основе значения коэффициента a можно сделать вывод, что свободная конвекция не вносит ощутимого вклада в определение скорости потока. Коэффициент k больше единицы, а значит, скорость потока, влияющая на перенос тепла, меньше средней скорости потока. По этой причине для использования предложенного датчика необходима калибровочная кривая.

На рис. 2 представлена блок-схема экспериментальной установки. Внутри трубки, по которой проходит жидкость, по центру расположен металлический микрокабель, внутри которого находится оптоволокно. В волокне для оценки распределения теплового поля по длине сформированы семь ВБР ($S1-S7$) длиной 1 mm каждая на длины волн от 1540 до 1570 nm, которые выполняют роль термометров. Принцип работы таких термометров хорошо известен: при воздействии температуры изменяются период и показатель преломления решетки, в результате чего центральная длина волны отраженного света смещается, а по величине этого

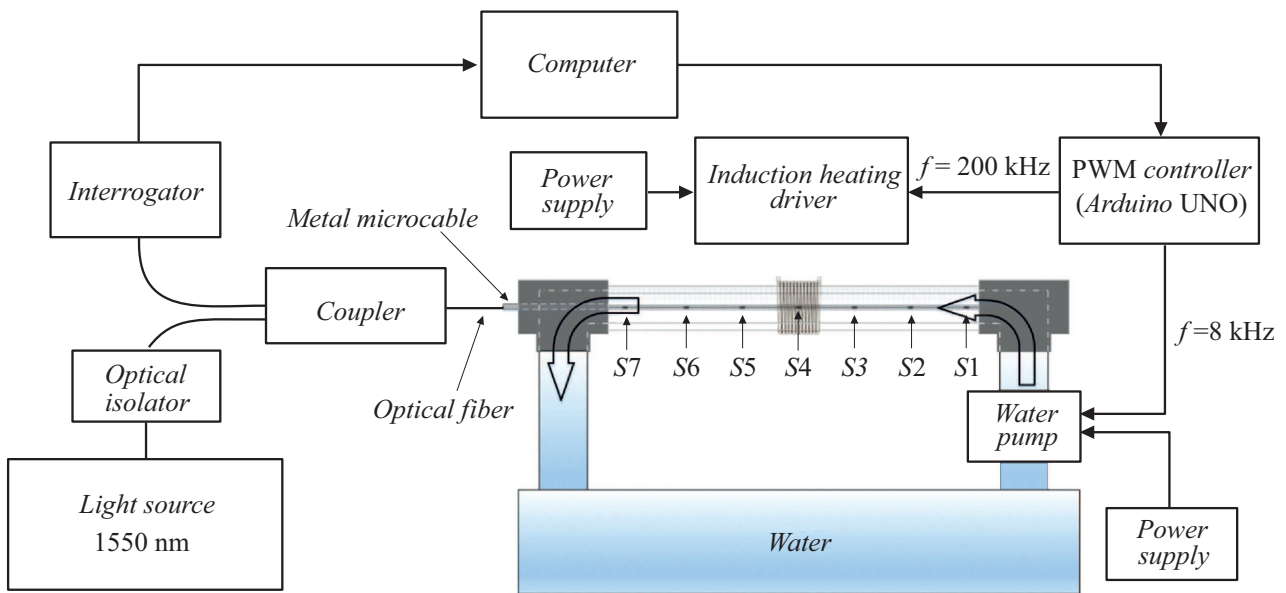


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки.

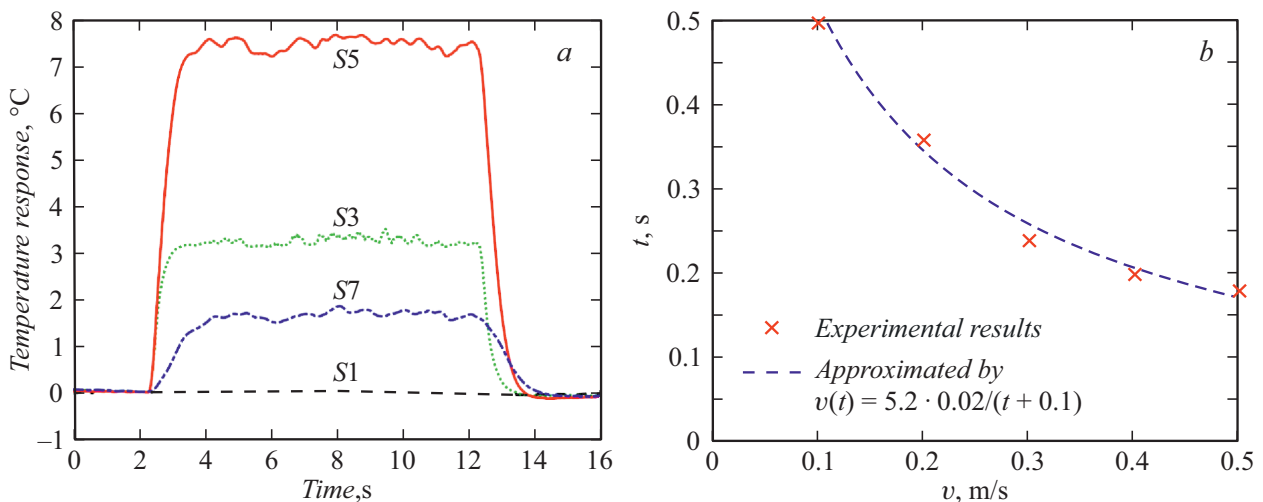


Рис. 3. Результаты эксперимента. *a* — температурный отклик с термодатчиков для скорости потока 0.3 m/s; *b* — зависимость времени прохождения импульса от средней скорости потока.

смещения судят об изменении температуры. Расстояние между соседними решетками было выбрано равным 1 см (как достаточный шаг по длине при оценке распределения теплового поля). На трубке сформирована медная катушка длиной 8 мм, которая является индукционным нагревателем. Средняя ВБР ($S4$) расположена в кабеле внутри поля индукционного нагревателя для контроля температуры нагрева. По остальным ВБР, расположенным по обе стороны от места нагрева, можно судить о скорости и направлении потока жидкости. Жидкость приводится в движение при помощи насоса. Управление насосом, формирующим заданную скорость потока жидкости, и мощностью нагрева индукционного нагревателя происходит с компьютера при помощи

ШИМ-контроллера (ШИМ — широтно-импульсная модуляция).

В эксперименте формировался тепловой импульс мощностью 2.5 W и длительностью 10 s при различной скорости потока воды: 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 и 0.5 m/s. Длины волн отражения ВБР записывались с частотой 50 Hz с помощью интеррогатора Ibsen Photonics, а затем с помощью пересчета были получены данные об изменении температуры с каждого датчика при проходе теплового импульса. На рис. 3, *a* представлен пример изменения температуры в зависимости от времени для скорости потока воды 0.3 m/s. По графику можно однозначно определить, что поток был направлен от $S1$ к $S7$, так как температура $S1$ не изменяется с появлением теплового

импульса. Изменение температуры на датчике S3 объясняется близким расположением указанного датчика к месту нагрева микрокабеля. Методом взаимной корреляции была рассчитана временная задержка при прохождении теплового импульса от датчика S5 к датчику S7, которые расположены на расстоянии 2 см друг от друга. По результатам проведенного эксперимента построена зависимость временной задержки теплового импульса от средней скорости потока (рис. 3, б), которая по своей сути является калибровочной кривой для указанного датчика. Полученная в ходе эксперимента кривая отличается от кривой, полученной в результате моделирования, так как при моделировании не учитывалась сложная структура микрокабеля, которая оказывает влияние на скорость распространения теплового импульса.

Результаты эксперимента подтверждают возможность измерения скорости потока жидкости при помощи предложенной схемы датчика. В ходе эксперимента при разнице температур порядка 6°C на датчиках, расположенных на расстоянии 2 см друг от друга, удалось детектировать время прохода теплового импульса от 0.2 до 0.5 с, что соответствует скорости потока в диапазоне 0.1–0.5 м/с. Случайная погрешность определения времени прохода оценивается как величина порядка 0.02 с. Скорость прохода теплового импульса между датчиками равна скорости потока жидкости только в идеальном случае, когда передача тепла обусловлена только движением жидкости. В проведенном эксперименте на скорость передачи теплового импульса также влияли тепловые характеристики стального микрокабеля. В конструкции датчика выявлена проблема с неравномерным распределением скоростей жидкости по диаметру трубки, что вносит искажения в определение скорости потока, и для работы с данным датчиком необходима калибровочная кривая, которая и была снята в ходе описанного эксперимента. Потенциально можно исключить необходимость калибровки, если добиться структуры датчика без искажения скорости потока жидкости элементами конструкции. Также необходимо минимизировать кондуктивную передачу тепла по микрокабелю и обеспечить перенос тепла преимущественно за счет жидкости. Расположение нескольких датчиков на разном радиальном расстоянии от центра трубки позволит получить общую картину распределения скоростей по диаметру и более точно рассчитать среднюю скорость, если это необходимо.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (госзадание № 2019-0923).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] V.A. Novikova, S.V. Varzhel, I.D. Tokareva, A.A. Dmitriev, *Opt. Quant. Electron.*, **52** (3), 132 (2020). DOI: 10.1007/s11082-020-2257-2
- [2] Y. Zhang, F. Wang, Z. Liu, Z. Duan, W. Cui, J. Han, Y. Gu, Z. Wu, Z. Jing, C. Sun, W. Peng, *Opt. Express*, **25** (20), 24521 (2017). DOI: 10.1364/OE.25.024521
- [3] C.R. Zamarreno, C. Martelli, V.H.V. Baroncini, E.N. dos Santos, M.J. da Silva, *J. Lightwave Technol.*, **33** (9), 1857 (2015). DOI: 10.1109/JLT.2015.2394788
- [4] P. Lu, Q. Chen, *Meas. Sci. Technol.*, **19** (12), 125302 (2008). DOI: 10.1088/0957-0233/19/12/125302
- [5] S. Gao, A.P. Zhang, H.-Y. Tam, L.H. Cho, C. Lu, *Opt. Express*, **19** (11), 10124 (2011). DOI: 10.1364/OE.19.010124
- [6] В.А. Новикова, С.А. Варжель, *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, **20** (4), 500 (2020). DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-4-500-506
- [7] Z. Liu, L. Htein, L.-K. Cheng, Q. Martina, R. Jansen, H.-Y. Tam, *Opt. Express*, **25** (4), 4393 (2017). DOI: 10.1364/OE.25.004393
- [8] R. Valiullin, R. Sharafutdinov, V. Fedotov, A. Ramazanov, G. Vakhitova, D. Kosmylin, in *SPE Russian Petroleum Technology Conf.* (Moscow, 2018), vol. 1, p. 1–10. DOI: 10.2118/191565-18rptc-ru
- [9] A.E. Hess, *Can. Geotech. J.*, **23** (1), 69 (1986). DOI: 10.1139/t86-008