

Затем по уравнению (7) рассчитаем значения абсолютной погрешности оптической плотности ΔD в диапазоне 0,01–0,20 Б при длине трассы зондирования $\Delta z = 10 \dots 1000$ м. Результаты расчёта приведены на рис. 3, б. Откуда следует, что можно измерять концентрацию молекул сероводорода в атмосфере 10^{11} см^{-3} на трассах зондирования 1 км с абсолютной погрешностью $\Delta N = 1,25 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ для выбранных ранее параметров лидара. Если длину трассы увеличить до 10 км, то для тех же параметров лидара можно зарегистрировать уровни концентрации молекул сероводорода до $2,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$.

Вычисленные значения относительной погрешности измерений концентрации молекул сероводорода в атмосфере для трасс зондирования 10, 100 и 1000 м равны соответственно 19,5; 19,6; 25,9 % и почти в два раза превышают теоретическое значение (8). Таким образом, относительная погрешность измерения концентрации исследуемых молекул сероводорода в диапазоне $10^{11} \dots 10^{14} \text{ см}^{-3}$ на длине волны лазерного излучения 3,83 мкм и расстояниях зондирования 10–1000 м лежит в диапазоне 20–26 % для

рассмотренного лидара дифференциального поглощения и рассеяния. Поэтому с помощью данного лидара можно регистрировать исследуемые молекулы сероводорода концентрацией до 10^{11} см^{-3} .

Работа выполнена в рамках основной части Государственного задания Министерства образования и науки РФ № 5.7721.2017/БЧ.

Л и т е р а т у р а

1. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Лидарное зондирование молекул сероводорода в атмосфере // Оптический журнал. 2017. Т. 84. Вып. 6. С. 71–74.
2. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987.
3. Зуев В. В., Катаев М. Ю., Макогон М. М., Мицель А. А. Лидарный метод дифференциального поглощения. Современное состояние исследований // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. Вып. 8. С. 1136–1164.

Дата принятия: 18.10.2017.

535.417

Метод определения дефектов на внутренних стенках трубопровода по распределению скорости текущей жидкости

В. В. ДАВЫДОВ^{1,3}, С. В. КРУЖАЛОВ¹, Н. М. ГРЕБЕНИКОВА¹, К. Я. СМЕРНОВ²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия

³Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии, районный центр Большие Вязёмы, Московская обл., Россия, e-mail: davydov_vadim66@mail.ru

Исследована структура потока жидкой среды в трубопроводе круглого сечения. Разработан метод определения дефектов внутренних стенок трубопровода с использованием рассеянного на частицах текущей жидкости лазерного излучения. Представлены результаты экспериментального определения профиля скоростей течения жидкости в сечении трубопровода по длине этого трубопровода. Предложена новая методика измерения координат точек, в которых располагается дефект, по длине и внутреннему диаметру трубопровода.

Ключевые слова: лазерное излучение, скорость течения жидкости, поток жидкой среды, фотоприёмник, доплеровский сдвиг частоты, спектр, дефект.

The article of structure investigation features for liquid medium stream in round section pipeline are considered. The new method for defects determination on the internal pipeline walls with the use of scattered laser radiation at flowing liquid particles was developed with considering of established features by us. The experimental investigation results of velocity profile changing of flowing liquid in pipeline cross-section along its length are presented. The article also presents the new method of coordinates points measuring at along the length and internal diameter of the pipeline, in which the defect is located.

Key words: laser light, the velocity of fluid flow, stream of fluid flow, photodetector, the Doppler shift frequency, spectrum, defect.

Исследования движения потоков жидкостей и суспензий – актуальные задачи прикладной физики [1–3]. Полученные результаты необходимы для разработки новых методов измерений физических величин потока жидкости, а также для ка-

либровки и совершенствования конструкций измерительных приборов [4–6]. В последнее время постоянно увеличивается номенклатура используемых жидких сред, расширяется диапазон расходов, в которых применяются данные среды для

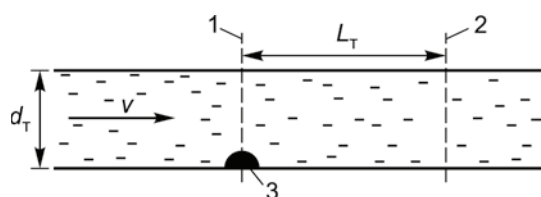


Рис. 1. Участок трубопровода с текущей средой:

1, 2 – сечения трубопровода в зонах с дефектом и без него, соответственно; 3 – дефект в виде выпуклости на внутренней стенке трубопровода

различных целей, возрастают требования к точности контроля параметров потока жидкости.

Наиболее сложны исследования потоков агрессивных и опасных сред, например бензола, гептана или концентрированной серной кислоты, а также биологических растворов и медицинских суспензий. При работе с такими веществами требуется особое соблюдение условий стерильности. Поэтому измерения в указанных средах необходимо проводить способами, где отсутствует непосредственный контакт измерительных элементов прибора с исследуемой средой [2, 3, 6–8]. Чаще всего для измерения скоростей текущей жидкости и расходов в таких средах используются бесконтактные электромагнитные, ультразвуковые и магнитные расходомеры, а также ядерно-магнитные спектрометры [5, 6, 9, 10]. Оптические приборы, принцип работы которых основан на эффекте Доплера, применяются крайне редко [7, 8, 11, 12]. Это связано с рядом особенностей использования данного метода для измерения скорости течения жидкости.

В настоящее время в связи с активным внедрением во врачебную практику искусственных сосудов и различных систем жизнеобеспечения человека, необходимых при лечении болезней, стала актуальна разработка надёжной системы контроля качества изготовления трубопроводов. Основные сложности при тестировании трубопроводов стали возникать при определении качества изготовления их внутренних поверхностей, т. е. установлении различных дефектов этих поверхностей. На внутренней стенке трубопровода (в предполагаемой зоне дефекта) происходит скопление веществ с последующим образованием инородных частиц. Отрыв этих частиц от стенки может привести к непредсказуемым последствиям. Больше всего опасен внутренний дефект в форме трещины, так как именно в трещине скапливаются различные частицы. При изменениях давления жидкой среды в трубопроводе в трещину поступают новые частицы и она расширяется. В искусственных сосудах этот процесс наиболее интенсивен, так как в жизненном цикле человека кровеносные сосуды постоянно расширяются и сужаются. В какой-то момент, например при резкой нагрузке, искусственный сосуд в зоне трещины может лопнуть, что приведёт к невыполнению функциональных задач по обеспечению жизнедеятельности человека и другим нежелательным последствиям.

Применение метода ядерного магнитного резонанса (ЯМР) в текущей жидкости, а также электромагнитная и ультразвуковая диагностики не позволяют определять данные дефекты.

Оптические зонды, с помощью которых получают видеоизображение о состоянии внутренних стенок трубопровода, использовать достаточно проблематично, так как нарушаются условия стерильности трубопровода, а на его внутренние стенки могут быть нанесены дополнительные повреждения при извлечении. При этом зонд указанные повреждения никак не зафиксирует. Кроме того, для эффективного поиска в трубопроводе внутренних дефектов внутренний диаметр трубопровода должен минимум в 3 раза превышать внешний диаметр зонда. В настоящее время минимальный внешний диаметр выпускаемых для решения подобных задач оптических зондов составляет 3,5–4,0 мм. Таким образом, возникает необходимость разработки новых методов для выявления дефектов на внутренних стенках трубопровода.

Одним из возможных вариантов решения данной проблемы может стать применение предложенного авторами метода, основанного на эффекте Доплера, так как трубопроводы, используемые в системах искусственного жизнеобеспечения человека и для производства биологических растворов, обладают достаточной прозрачностью на определённых длинах волн лазерного излучения.

Метод определения дефекта и экспериментальная установка. На рис. 1 представлен участок трубопровода круглого сечения с диаметром d_T . На внутренней стенке трубопровода в сечении 1 расположен дефект 3 в форме выпуклости. В зоне дефекта скорость v текущей жидкости (по поперечному сечению 1) должна отличаться от скорости течения в точке трубопровода, находящейся в сечении 2. Кроме того, в зоне дефекта нарушится симметрия распределения в профиле скорости текущей жидкости по диаметру трубопровода относительно его центральной оси. В трубопроводе круглого сечения, не содержащем дефектов, данное распределение скоростей течения жидкости для ламинарного и турбулентного режимов носит симметричный характер [3, 7, 12]. Сравнив измеренные профили скорости течения жидкости в сечениях 1, 2, а также проанализировав характер изменения в этих сечениях скорости течения жидкости, можно сделать вывод о существовании дефекта на внутренней стенке трубопровода в сечении 1.

Если дефект в форме трещины появится на внутренней стенке трубопровода, то около места её расположения образуется вихревая зона. В этой зоне, в отличие от рассмотренного ранее дефекта в форме выпуклости (см. рис. 1), произойдёт перераспределение скоростей течения жидкости. В одной точке скорость течения увеличится, т. е. скорость вихря будет направлена навстречу течению потока, а в другой – уменьшится, т. е. скорость вихря будет направлена навстречу течению потока жидкости. Измерив несколько распределений профилей скорости течения жидкости в различных сечениях трубопровода по его длине, можно установить существование данной вихревой зоны, что будет соответствовать присутствию трещины на внутренней стенке трубопровода.

Проведённые эксперименты показали, что рассмотренные изменения в профиле распределения скоростей текущей жидкости наблюдаются при турбулентном течении, так как скорость течения жидкости у стенок трубопровода в этом случае

выше, чем при ламинарном течении [3, 12]. Для исследования распределения скорости течения жидкости в сечении трубопровода предложенным авторами методом была разработана экспериментальная установка (рис. 2). В качестве текущей жидкой среды использовалась фильтрованная вода комнатной температуры. В воду были добавлены частицы (шарики полистирола диаметром 1 мкм), на которых рассеивалось лазерное излучение. Концентрация частиц полистирола в воде составляла 10^4 см^{-3} . В отличие от других частиц, шарики полистирола идеально сочетаются с водной средой. При её протекании (особенно при больших скоростях течения по трубопроводу) частицы полистирола движутся с той же скоростью, что и молекулы воды. Частицы полистирола не запаздывают в текущей жидкости как, например, частицы туши в случае их добавления в воду. Запаздывание частиц, на которых происходит рассеяние лазерного излучения, приводит к дополнительным погрешностям при измерениях скорости течения жидкости. В результате такие погрешности могут достигать более 5 % [7, 8, 11].

В разработанной экспериментальной установке в качестве исследуемого участка трубопровода взяли стеклянную трубку из кварцевого стекла КУ-1С. Трубка имела внутренний и внешний диаметры $d_{\text{т}}=13 \text{ мм}$, $d_{\text{вн}}=17 \text{ мм}$, соответственно. На внутренних стенках этой трубки с помощью технологий, которые имелись в распоряжении авторов, создавали различные дефекты (выпуклости и трещины) и контролировали их размеры.

Для создания дефектов в трубопроводе, который представлял собой прямую трубу, применяли игловые нагревательные элементы со специальными держателями – такие элементы широко используются в стеклотрубопроводных технологиях. Выпуклость на внутренней поверхности трубопровода создавали при воздействии на его внешнюю сторону нагревательным элементом. По специализированной шкале игольчатого зонда контролировали глубину погружения в стекло специальной иглы, выбранной в качестве нагревательного элемента. По другой шкале визуально определяли, насколько полученная выпуклость (в форме полусферы) возвышается над исходной внутренней стенкой трубопровода. Дополнительно данный дефект обследовали оптическим зондом. На основании полученного с его помощью изображения определяли размер выпуклости, т. е. радиус полусферы $R_{\text{пс}}$.

Дефект в форме трещины в стеклянном трубопроводе создавали разогретой иглой стеклотрубопроводного манипулятора. Так как равномерность глубины трещины в трубопроводе при большой её длине $L_{\text{т}}$ регулировать сложно, в проведённых экспериментах авторы рассматривали трещины, имеющие длину $L_{\text{т}}=(10,0 \pm 0,5) \text{ мм}$. Ширина трещины составляла

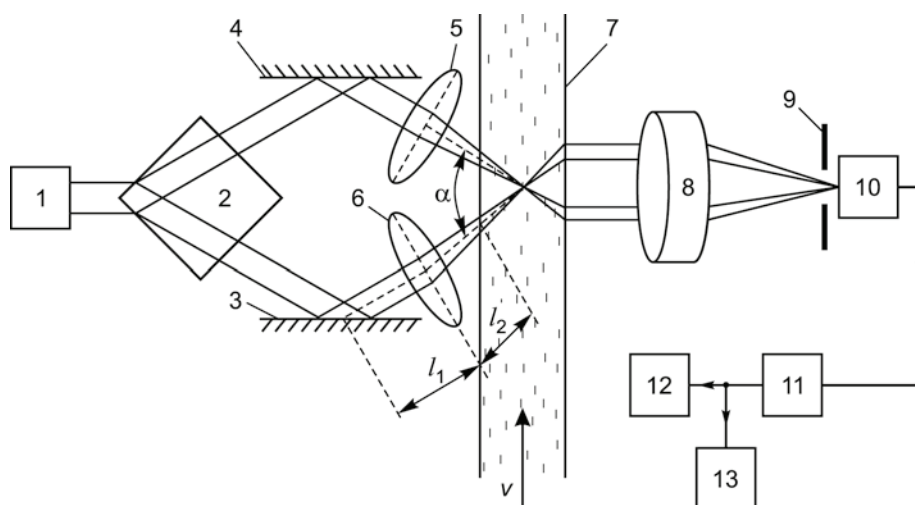


Рис. 2. Структурная схема дифференциального оптического доплеровского измерителя скоростей:

1 – оптический квантовый генератор (лазер); 2 – призма – ромб; 3, 4 – зеркала; 5, 6 – фокусирующие линзы; 7 – стеклянный трубопровод; 8 – объектив; 9 – диафрагма с регулируемой апертурой; 10 – фотоприёмник; 11 – широкополосный усилитель; 12 – анализатор спектра; 13 – осциллограф

($1,0 \pm 0,2$) мм, а глубина изменялась в диапазоне 0,5–1,0 мм. Глубину трещины после экспериментов оценивали с внешней стороны трубопровода с помощью линейки (на коротком участке трубопровода для выбора режима нагрева и корректировки движения манипулятора), а также по результатам обследования трещины оптическим зондом.

В качестве источника излучения в экспериментальной установке (см. рис. 2) был задействован полупроводниковый лазер 1, имеющий мощность излучения $P_{\text{изл}}=5 \text{ мВт}$ и длину волны $\lambda=630 \text{ нм}$. Угол α расходимости лазерного пучка составлял 1 мрад. Лазер генерировал излучение в режиме основной TEM_{00} -моды. Излучение подавалось на грань 2 призмы в виде ромба, имеющего размеры боковых поверхностей $4,5 \times 3,6 \text{ см}$. Угол между боковыми поверхностями призмы, т. е. гранями, на одну из которых направляется лазерное излучение, был равен 60° . В призме происходило разделение лазерного пучка на две одинаковые составляющие. Эти пучки с помощью зеркал 3, 4, положение которых можно изменять, подавались на фокусирующие линзы 5, 6 с фокусным расстоянием $f_{\text{л}}=10 \text{ см}$. Фокусное расстояние линз, а также их положение между зеркалами и внешней стенкой трубопровода (расстояния l_1, l_2) было выбрано так, чтобы размер пятна лазерных пучков в зоне их пересечения позволял получить шаг интерференционной картины, согласованный с размерами частиц полистирола в текущей воде. В случае широкой зоны пересечения двух лазерных пучков в ней могут оказаться частицы полистирола, движущиеся по сечению трубопровода с разными скоростями. Это приведёт к резкому снижению контраста регистрируемой фотоприёмником 10 интерференционной картины. Такая картина поступает на фотоприёмник через объектив 8 и ограничивающую диафрагму 9 с шириной щели 2 мм.

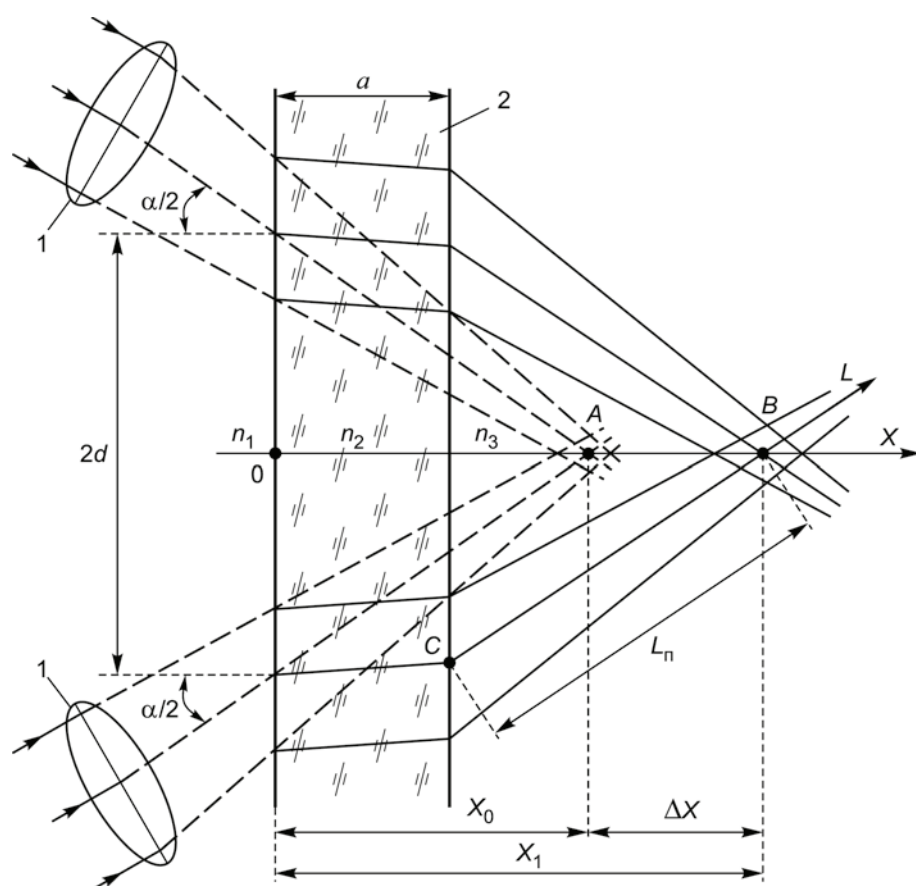


Рис. 3. Схема расфокусировки лазерных пучков в трубопроводе с текущей жидкостью:
1 – фокусирующие линзы; 2 – стенка трубопровода

Фокусное расстояние объектива изменяется в интервале 10–15 см. Это расстояние и размеры диафрагмы выбраны таким образом, чтобы исключить попадание на фотоприёмник паразитных засветок. Особенностью схемы экспериментальной установки является то, что параллельность волновых фронтов рассеянных лазерных пучков выполняется в любом направлении, так как они распространяются в одинаковых условиях. Ещё одной особенностью схемы является независимость ширины спектра биений от апертуры, собирающей рассеянный свет объектива. Такая независимость связана с тем, что биения дают только световые волны, идущие строго в одном направлении.

Так как при регистрации на фотоприёмнике волновые векторы рассеянного излучения будут расположены в одной плоскости, что является особенностью построения экспериментальной установки по дифференциальной схеме, то скорость течения жидкости можно определять по измеряемому доплеровскому сдвигу частоты Δf_D , используя следующее соотношение:

$$\Delta f_D = 2v \sin(\alpha/2) / \lambda, \quad (1)$$

где α – угол между двумя пучками лазерного излучения, падающего на стенку трубопровода.

В соответствии с (1) верхний предел измерения скорости v течения жидкости для длины волны λ лазерного излучения будет определяться углом α (см. рис. 2), а также шириной полосы фотоприёмника (полоса может достигать 300 МГц при использовании фотоэлектронного умножителя) и особенностями конструкции экспериментальной установки. При этом важно учитывать диапазон возможных реализуемых гидравлических давлений жидкости в трубопроводе. Угол α при проведении измерений скорости течения жидкости можно изменять в широких пределах (от 6 до 120°), регулируя положения зеркал и линз. Данный факт подтверждает преимущество разработанной установки на основе дифференциальной схемы перед другими установками для измерения скорости течения жидкости методом Доплера. Это позволяет для выявления дефектов на внутренних стенках трубопровода применять турбулентный режим течения жидкости с высоким числом Рейнольдса $Re > 8000$.

Нижний предел измерения скорости течения жидкости в разработанном методе определяется шириной полосы спектра лазерного излучения. При высокой скорости течения жидкости измеряемый сдвиг частоты Δf_D по интерференционной

картине рассеянного лазерного излучения (1) на частицах в потоке жидкости намного больше, чем разброс частот в спектре лазерного излучения, который связан с его немонохроматичностью. При уменьшении скорости течения порядок этих величин в определённый момент выравнивается, что значительно снижает контраст интерференционной картины и не позволяет проводить измерения частоты Δf_D . Чем уже спектр лазерного излучения, тем меньше скорость течения жидкости, которую можно измерить.

При определении профиля скорости течения жидкости по сечению трубопровода (см. рис. 1), во избежание дополнительных погрешностей при измерениях Δf_D , необходимо учитывать следующие обстоятельства. Лазерный пучок перед попаданием в заданную точку текущего потока жидкости (в которой измеряется скорость течения жидкости) проходит несколько границ сред (воздух–стекло, стекло–вода) с различными показателями преломления. На границах этих сред происходит трансформация пучка. Кроме того, в разработанной экспериментальной установке по этой же причине смещается по оси X зона пересечения лазерных пучков. В данной зоне образуется интерференционная картина, по которой определяется Δf_D . Если бы трубопровод с текущей средой отсутствовал, то данная зона располагалась бы в фокусе линз 1 с центром в точке A (рис. 3). В реальности, после прохождения гра-

ниц отмеченных сред, центр зоны располагается в некоторой точке B , находящейся от точки A на расстоянии ΔX . Точкой C обозначено положение центра лазерного пучка на внутренней стенке трубопровода после преломления на границе воздух-материал трубопровода.

Для определения смещения ΔX в используемой экспериментальной установке был выполнен расчёт, позволяющий получить равенство

$$\Delta X = d \left(\frac{n_1 \sin(\alpha/2)}{[n_3^2 - n_1^2 \sin^2(\alpha/2)]^{1/2}} - \operatorname{tg}(\alpha/2) \right) + a \left(1 - \frac{n_3^2 \sin^2(\alpha/2)}{[n_3^2 - n_1^2 \sin^2(\alpha/2)]^{1/2} [n_2^2 - n_1^2 \sin^2(\alpha/2)]^{1/2}} \right), \quad (2)$$

где a – толщина стенки трубопровода; n_1 – показатель преломления среды, из которой падает излучение на стенку трубопровода; n_2 – показатель преломления материала, из которого изготовлен трубопровод; n_3 – показатель преломления с текущей среды; d – половина расстояния между точками падения пучков лазерного излучения на стенку трубопровода.

Формула (2) прошла экспериментальную проверку по следующей методике. Настройка измерительной схемы при определении скорости течения жидкости осуществляется по максимальной величине сдвига частоты Доплера Δf_D , которая соответствует наибольшей скорости в сечении трубопровода. Независимо от режимов течения жидкости в трубопроводе её скорость максимальна на центральной оси трубопровода. На начальном этапе измерения скорости течения жидкости центральная ось трубопровода размещается в точке A (см. рис. 3). В этой точке лучи после линз пересекутся, если будут распространяться по воздуху, т. е. без трубопровода. Расстояние $2d$ между лучами и угол α выбирают такими, чтобы при измерениях скорости потока жидкости отношение сигнал–шум регистрируемого фотоприёмником сигнала было не меньше 1,5. При более низком значении сигнал–шум обработка регистрируемого сигнала будет затруднительна. Далее трубопровод перемещается вдоль оси X , перпендикулярной потоку жидкости. Указанная ось совпадает с направлением распространения излучения. В некоторой точке после перемещения по оси X регистрируется максимальное значение частоты Δf_D , что соответствует максимальной скорости течения жидкости. Измерив смещение трубопровода вдоль оси X до достижения точки максимума скорости течения жидкости, определим величину ΔX , значение которой можно также оценить по формуле (2). Проведённые измерения показали, что расхождение между экспериментальными и теоретическими значениями ΔX с учётом всех погрешностей не превышает 2 %.

Вычисления трансформации гауссова пучка для разработанной авторами экспериментальной установки были выполнены с помощью матриц передачи [11, 13] для случая, когда поверхность зеркал 3, 4 (см. рис. 2) находится в центре перетяжек лазерных пучков, вышедших из призмы 2. Оптическая система от поверхности зеркала 3 до точки пересечения

пучков в трубопроводе классифицируется как сложная. Поэтому при расчёте её удобно разбить на отдельные элементы и составить матрицу передачи для каждого из них. Матрица совокупности, соответствующая всей оптической системе, находится перемножением элементарных матриц. В [13] рассмотрены примеры таких матриц. В результате выполненных расчётов авторы вывели следующее выражение:

$$W_{и.п}(L) = W_n \left[1 + \left(\lambda \frac{L - L_n}{\pi n_3 W_n^2} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (3)$$

где $W_{и.п}$ – изменение радиуса пучка; W_n – радиус пучка в перетяжке; L_n – положение координаты перетяжки по оси распространения луча L .

Выражение (3) для случая размещения трубопровода в воздухе позволяет рассчитать параметры гауссова пучка в точке измерения скорости течения жидкости в зависимости от угла α , показателя преломления n_2 материала, из которого изготовлен трубопровод, а также показатель преломления текущей жидкости n_3 .

Для параметров лазерного излучения и экспериментального участка трубопровода из кварцевого стекла ($n_2=1,457$) с текущим потоком воды при $\alpha=8^\circ$ вычислили изменение радиуса пучка $W_{и.п}(L)$ в зоне измерения скорости течения жидкости при перемещении трубопровода вдоль оси X на расстояние 8 мм. Расчёты делали без учёта юстировки оптической системы по максимуму значения скорости текущей жидкости. Как правило, указанную юстировку осуществляют при измерениях данной величины. Разброс значений $W_{и.п}(L)$ составил 0,5–1,2 мм. Полученный результат показывает, что в одной из точек измерения скорости течения жидкости пучки должны пересекаться в перетяжках. Следовательно, выбрав угол α с учётом того, чтобы верхний предел измерения скорости течения жидкости (см. выражение (1)) был достаточно высок (на низких скоростях влияние дефекта на изменения в профиле скорости течения жидкости незначительно), в некоторых случаях можно получить пересечение пучков в перетяжках на центральной оси трубопровода. В случае пересечения лазерных пучков в перетяжке отношение сигнал–шум будет максимальным.

Результаты экспериментальных исследований. Регистрируемый фотоприёмником сигнал рассеянного от частиц движущейся жидкости лазерного излучения после проведения Фурье-преобразования представляет собой спектр, по центральной частоте пика которого определяется Δf_D . Далее, с помощью формулы (1) можно определить скорость течения жидкости в заданной точке трубопровода. При уменьшении контраста интерференционной картины, регистрируемой фотоприёмником при перемещении центра пересечения лазерных пучков с центральной осью трубопровода ближе к стенке, необходимо регулировать положение оптических элементов 3–6 (см. рис. 2) и настроить схему так, чтобы отношение сигнал–шум центрального пика превышало 1,5. В случае необходимости это позволит накапливать сигнал и измерять скорости течения жидкости с погрешностью не более чем 2 %.

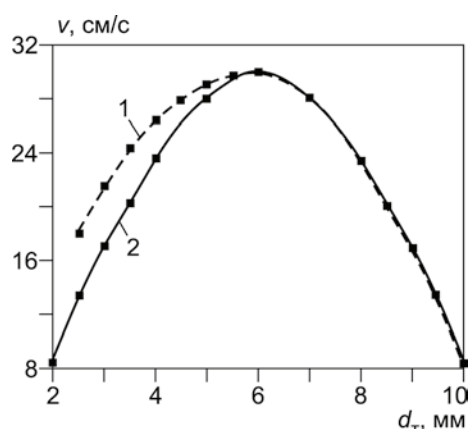


Рис. 4. Распределение скорости потока по поперечным сечениям участка трубопровода:
1 — для поперечного сечения 1; 2 — для поперечного сечения 2

На рис. 4 в качестве примера представлены результаты измерения распределения скорости текущей жидкости в двух сечениях трубопровода, расположенных, как и на рис. 1, на расстоянии $L_T=20$ см. В сечении 1 находится дефект в форме выпуклости с $R_{nc}=(1,0\pm0,1)$ мм. Температура воды составляла $T=20,2$ °С. Погрешность определения скорости течения жидкости определялась в соответствии со стандартными методиками [14, 15] с достоверностью 95 % при проведении 20 измерений скорости для каждой из определённых авторами точек трубопровода. Измеренные (в центре трубопровода) предложенным методом на основе эффекта Доплера значения скорости совпали в пределах допустимой погрешности со значениями скорости жидкой среды в этой же зоне трубопровода, но найденными по расходу жидкости q с помощью мерного объёма и меточного ЯМР-расходомера. Погрешность измерений расхода q не превысила 1 % [6, 10]. При использовании мерного объёма для определения каждого значения скорости измерения расхода тоже выполняли 20 раз. Среднее значение q и относительная погрешность его измерения с достоверностью 95 % также рассчитывались в соответствии с методиками [14, 15]. При вычислении скорости течения жидкости по значению q необходимо учитывалась погрешность определения площади внутреннего сечения трубопровода. Поэтому погрешность нахождения скорости течения жидкости определялась по правилам расчёта погрешностей косвенных измерений и не превышала 1,5 % для применяемых расходов жидкости q при тестировании трубопроводов в экспериментальной установке.

Сравнив значения скоростей течения жидкости на графиках 1, 2 (см. рис. 4), можно установить нарушение симметрии относительно центральной оси трубопровода в одном из профилей скорости текущей жидкости в его сечении. Кроме того, в зоне дефекта (сечение 1) произошло увеличение скорости текущей жидкости по сравнению с сечением 2. Данный результат доказывает наличие дефекта на внутренней стенке трубопровода в сечении 1. Таким образом, по максимальному изменению в профиле скорости текущей жидкости можно определить координаты точки (или зоны), в которой на трубопроводе располагается данный дефект.

Экспериментальные исследования показали, что без применения выражений (2), (3) настройка экспериментальной установки для определения внутренних дефектов предложенным авторами методом затруднительна. В случае измерений скорости текущей жидкости в большой зоне пересечения лазерных пучков в ней могут оказаться частицы с различными скоростями, что приведёт к измерению скорости течения жидкости с погрешностью более 10 % [7, 11]. Кроме того, проведённые исследования позволили установить условие $\Delta X < d_T/8$, невыполнение которого не позволяет определять дефекты на внутренних стенках трубопровода по изменению профиля распределения скоростей по сечению трубопровода. Указанный факт является ещё одним ограничением применения данного метода в дополнении к условию прозрачности стенок исследуемого трубопровода для видимого и ближнего инфракрасного диапазона лазерного излучения.

Закключение. Полученные экспериментальные результаты подтвердили возможность однозначного установления существования дефектов на внутренних стенках трубопровода. С помощью разработанного метода можно предварительно протестировать трубопровод перед его применением, что обеспечит качественную работу используемой на реальных объектах аппаратуры.

При применении разработанного метода на реальных объектах могут появиться существенные сложности. Например, текущая жидкая среда может обладать низкой прозрачностью к используемому в методе лазерному излучению, размер молекул в среде, на которых происходит рассеяние излучения может быть меньше длины волны λ лазерного излучения и т. д. Такие затруднения приведут к резкому уменьшению контраста интерференционной картины, регистрируемой фотоприёмником, а также к существенным погрешностям при определении скорости течения жидкости. Проведённые эксперименты показали, что по результатам исследований в таких условиях невозможно гарантировать однозначный вывод о наличии дефекта на внутренних стенках трубопровода в отличие от предварительного его тестирования на разработанной экспериментальной установке. Кроме того, определение точного места положения дефекта на внутренней стенке трубопровода позволяет в ряде случаев удалить участок с дефектом из трубопровода, а остальную часть трубопровода использовать по назначению. Особенно это актуально для искусственных сосудов, где «заготовка» гораздо больше, чем необходимый для замены участок.

Результаты экспериментальных исследований позволили установить, что изменение скорости течения жидкости в зоне расположения трещины существенно зависит от её ориентации по отношению к потоку жидкости, а также от глубины. Данный дефект требует более детального рассмотрения по сравнению с выпуклостью, что будет являться предметом дальнейших исследований.

Л и т е р а т у р а

1. Popovac M., Hanjalic K. Compound wall treatment for RANS computation of complex turbulent flows and heat transfer //

Flow, Turbulence and Combustion. 2007. V. 78. No. 2. P. 177–184.

2. **Давыдов В. В., Дудкин В. И., Карсеев А. Ю., Вологдин В. А.** Особенности применения метода ядерно-магнитной спектроскопии для исследования потоков жидких сред // ЖПС. 2015. Т. 82. № 6. С. 898–902.

3. **Гиргидов А. Д.** Механика жидкости и газа. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2007.

4. **Даев Ж. А.** Метод измерения пульсирующего расхода жидкости // Измерительная техника. 2016. № 3. С. 29–31.

5. **Лесников Е. В., Балаханов Д. М., Добровольский В. И.** Метрологическое обеспечение жидкостных и аэрозольных счетчиков // Измерительная техника. 2017. № 1. С. 60–63.

6. **Давыдов В. В.** Ядерно-магнитный спектрометр для исследования потоков жидких сред // Измерительная техника. 2016. № 11. С. 46–51.

7. **Зубов В. А., Ринкевичюс Б. С.** Оптические методы исследования потоков // Квантовая электроника. 1997. Т. 24. № 12. С. 1161–1163.

8. **Бороздова М. А., Федосов И. В., Тучин В. В.** Метод анализа лазерного доплеровского анемометра для измерения скорости течения крови // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 3. С. 275–282.

9. **Alekseenko S. V., Cherdantsev A. G., Dulin V. M.,**

Kozorezov Yu. S., Markovich D. M. Application of a high-speed laser-induced fluorescence technique for studying three-dimensional structure of annular gas-liquid flows // Exp. Fluids. 2011. V. 53. No. 3. P. 37–43.

10. **Давыдов В. В., Дудкин В. И., Карсеев А. Ю.** Малогабаритный меточный ядерно-магнитный расходомер для измерения быстроменяющихся расходов жидкости // Измерительная техника. 2015. № 3. С. 48–51.

11. **Богданов С. В., Ринкевичюс Б. С., Чудов В. Л.** Трансформация гауссова пучка элементами лазерного анимометра // Квантовая электроника. 1978. Т. 5. № 7. С. 1476–1484.

12. **Vologdin V. A., Davydov V. V., Velichko E. N.** On specific features of investigation of fluid flows by photometric techniques // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 741 (1). P. 012095.

13. **Звелто О.** Принципы лазеров. СПб.: Изд-во «Лань», 2008.

14. **Зайдель А. Н.** Погрешности измерения физических величин. М.: Наука, 1985.

15. **Ангерер А.** Техника физического эксперимента. М.: ФИЗМАТГИЗ, 1962.

Дата принятия: 11.12.2017.

