

Неинвазивные методы контроля расхода жидкостей с применением накладных преобразователей и учетом отложений в трубопроводах



Во время эксплуатации трубопроводов появляются отложения на внутренней поверхности трубы, которые сужают ее диаметр и влияют на результаты измерений систем учета, поэтому необходимо вносить соответствующую поправку. При этом, как правило, невозможно узнать толщину и состав отложений без вскрытия трубы. В статье предложен метод, позволяющий установить эти данные неинвазивным путем – с помощью установки по имитации условий заужения трубопроводов.

ООО «Константа УЗК», г. Санкт-Петербург

В связи с развитием топливно-энергетического комплекса России, вводом в эксплуатацию новых транспортных магистралей добываемого углеводородного сырья, заменой устаревших систем учета, а также в рамках исполнения плана правительства РФ по импортозамещению технологического оборудования в нефтегазовой сфере все более активно применяются расходомеры жидкостей и газа с накладными ультразвуковыми преобразователями (ПЭП).

Применение накладных преобразователей более выгодно с экономической точки зрения как на новых объектах, так и на модернизируемых. ПЭП не имеют конструктивных элементов, контактирующих с измеряемой средой, или подвижных узлов, что исключает необходимость в регулярном техническом обслуживании. У ПЭП нет физического износа твердыми частицами попутной транспортировки, для них не требуется специальная установка фильтрующих элементов для устранения указанных помех, что позволяет сохранить условный диаметр прохода труб.

Однако существует ряд проблем, которые затрудняют их использование. Достоверность измерений в основном зависит от уровня подготовки специалиста, невозможно оценить состояние трубопровода изнутри без дополнительных технических средств. Если состояние трубопровода отличается от вновь водимого в эксплуатацию, то достоверность измере-

ний можно поставить под сомнение. Отложения на стенках в виде ржавчины, парафина и прочих сред, характерные для труб, транспортирующих жидкости, существенно снижают качество контроля, вносят дополнительные погрешности в результате измерений. Попробуем разобраться с данным вопросом.

Как известно, принцип действия ультразвуковых расходомеров основан на том, что при распространении УЗ-колебаний в движущейся контролируемой среде скорость ультразвука относительно неподвижной системы координат (стенки трубопровода) равна векторной сумме скорости ультразвука относительно среды и скорости самой среды относительно трубопровода, а используемый времяимпульсный метод основан на измерении времени прохождения ультразвукового сигнала по направлению и против направления движения потока жидкости в трубопроводе (рис. 1).

Возбуждение и прием сигнала производится накладными ПЭП, которые устанавливаются на трубопровод, как показано на рис. 2. К участкам, на которые будут устанавливаться преобразователи, предъявляются определенные требования, например, на входе и выходе ПЭП должны быть прямолинейные участки с условным диаметром, равным диаметру измерительного участка. Но основным преимуществом использования накладных ПЭП является отсутствие требований для остановки технологического процесса, как в случае с врезными датчиками.

Установка ПЭП должна осуществляться в местах полного заполнения трубы, например, как показано на рис. 2б, при движении жидкости снизу вверх. В зависимости от конструктивных и технических особенностей объекта контроля, ПЭП могут быть установлены по V- или Z-схеме (рис. 3), при этом количество проходов луча может быть увеличено для обеспече-

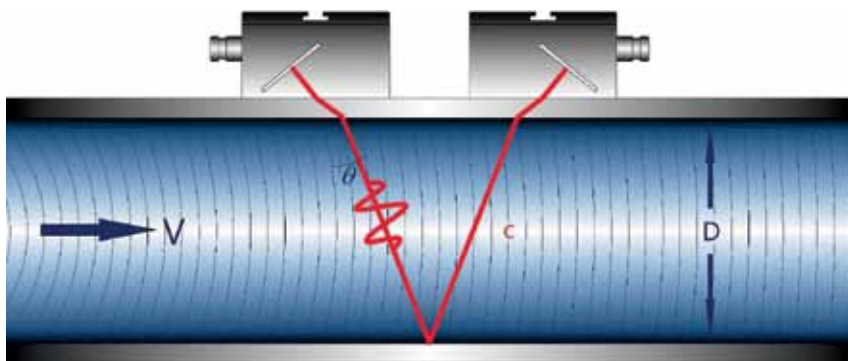


Рис. 1. Принцип измерения с использованием накладных ПЭП



а



б

Рис. 2. Варианты установки накладных ПЭП на трубопровод: а – горизонтальная; б – вертикальная

ния стабильности и точности результатов измерения.

Оптимальное количество проходов луча будет зависеть от диаметра трубы, вида транспортируемой жидкости, частоты применяемого ПЭП. Например, при измерении на больших диаметрах (от 1000 мм) применяются ПЭП с частотой 0,5 МГц и для получения достаточной амплитуды сигнала ПЭП, как правило, устанавливаются по Z-схеме в один проход, так как в этом случае при увеличении количества проходов амплитуда сигнала уменьшается и ее может быть недостаточно для проведения измерения. И напротив, при установке ПЭП на трубу диаметром 108 мм количество проходов следует увеличить, чтобы увеличить путь прохождения сигнала.

Основным недостатком ультразвукового метода контроля расхода является зависимость результатов измерений от акустических характеристик сред, через которые проходит ультразвуковая волна.

Известно, что объемный расход вычисляется по формуле:

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} v, \quad (1)$$

где D – внутренний диаметр трубы, мм; v – скорость потока, м/с.

А скорость потока, усредненная вдоль ультразвукового луча, определяется как:

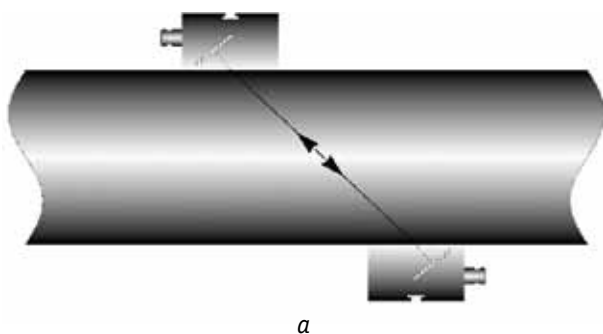
$$v = \frac{c}{2 \times n \times D \times \tan \theta} [(T_2 - T_1) - \Delta T_0], \quad (2)$$

где c – скорость распространения ультразвука в неподвижной жидкости; D – внутренний диаметр трубопровода; θ – угол между направлением распространения ультразвукового сигнала и плоскостью, перпендикулярной оси трубопровода; T_1 – полное время прохождения ультразвукового сигнала по направлению движения потока; T_2 – полное время прохождения ультразвукового сигнала против направления движения потока; ΔT_0 – разность времен прохождения сигналов по неподвижной жидкости («смещение нуля» расходомера); n – количество проходов ультразвукового сигнала через объект контроля (зависит от схемы установки преобразователей).

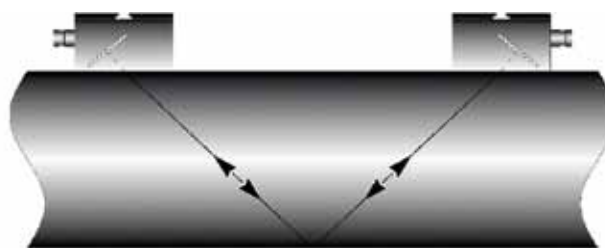
Как видно из формулы (2), скорость потока жидкости зависит от скорости распространения ультразвука в этой жидкости и угла ввода ультразвуковых колебаний в исследуе-

мую среду. В свою очередь, угол ввода рассчитывается по закону Снеллиуса и зависит от параметров применяемого преобразователя – скорости в материале и угла призмы, а также параметров материала трубопровода. Отсюда возникает вопрос: каким образом повлияет на результат измерений наличие на внутренней стенке трубопровода дополнительной среды?

В процессе эксплуатации трубопроводов в них появляются дефекты, такие как коррозия внутренних стенок, отложения на стенках и т. п. Если имеются отложения, провести их диагностику без вскрытия трубопровода невозможно. Кроме того, в зависимости от назначения трубопровода и, скорее, вида транспортируемой жидкости, отложения могут иметь различный состав, что влияет на их акустические свойства. Чаще всего отложения накапливаются в трубопроводах, по которым транспортируется вода (чистая или содержащая примеси) и (или) нефтепродукты. Наличие



а



б

Рис. 3. Схема установки накладных ПЭП: а – Z-схема; б – V-схема

отложений на внутренней стенке трубопровода сужает его сечение, вследствие чего увеличивается скорость потока при неизменном расходе.

На графиках (рис. 4) представлена зависимость изменения результата измерений расхода и изменения сечения трубопровода от толщины отложений на внутренней поверхности. Как видно, влияние отложений более существенно на трубах малого диаметра. На трубе диаметром 25 мм с толщиной стенки 3 мм при наличии отложения толщиной 1 мм изменение внутреннего сечения составляет 20%, а ошибка измерения расхода – 11%. А при диаметре трубы 1020 мм с толщиной стенки 10 мм отложения толщиной 5 мм сужают сечение на 2%, а ошибка измерения расхода составляет 1%, что находится в пределах погрешности прибора. Таким образом, диагностировать наличие отложений в трубе диаметром 1020 мм толщиной до 5 мм по результатам измерений, как в случае с малыми диаметрами, где можно предположить наличие ошибки в измерениях, не представляется возможным.

На сегодняшний день оперативных и надежных неразрушающих методов диагностики отложений не существует. Поэтому был предложен косвенный метод учета толщины отложений на внутренней поверхности трубопровода, основанный на методе сравнения параметров контролируемой среды в лабораторных условиях и в рабочем состоянии на объекте контроля.

Основные этапы метода учета толщины отложений заключаются в следующем:

- исследование отложений и определение их акустических характеристик;
- создание образцового макета, повторяющего параметры объекта контроля;
- определение скорости распространения ультразвуковых колебаний в исследуемой среде;
- проведение измерений на объекте контроля, определение скорости распространения ультразвуковых колебаний в движущейся исследуемой среде;
- определение наличия отложений;
- введение поправок на влияние отложений при измерении расхода.

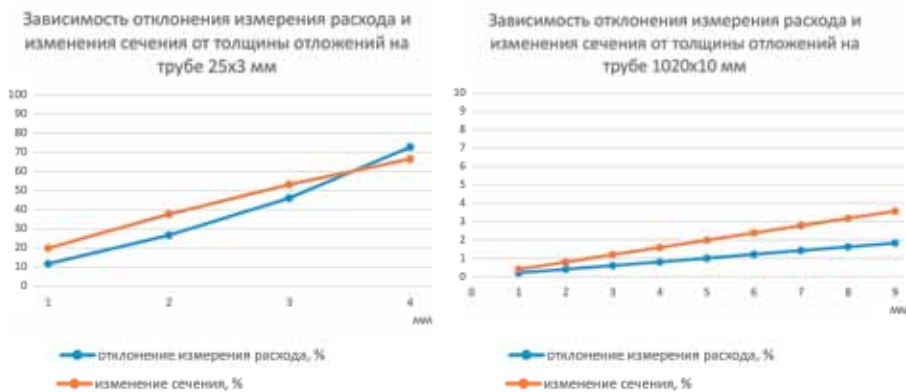


Рис. 4. Графики зависимости отклонения измерения расхода и изменения сечения от толщины отложений

Реализация этапного подхода позволяет учесть свойства и размер отложений, тем самым обеспечив достоверность результатов измерений.

В большинстве случаев номенклатура контролируемых объектов ограничена, и их можно объединить в группы со схожими характеристиками. Следовательно, транспортируемые среды, расход которых необходимо контролировать, тоже могут быть объединены в группы и для каждой группы будут характерны определенные типы отложений. Поэтому исследование их акустических характеристик будет носить накопительный характер, и полученную информацию можно будет использовать уже как справочную. Существует много работ и исследований на эту тему. Проблема

отложений в основном актуальна на изгибах трубопроводов и узлах учета потребления из-за технологических заужений диаметров труб. На прямых участках эта проблема менее ощутима из-за возможности прочистки механическими способами и невысоких загрязнений. В табл. 1 представлены основные виды отложений, причины их появления и влияние на процесс измерений.

Метод диагностики отложений по сути является методом сравнения исследуемой среды в лабораторных условиях и на объекте. По изменению результата измерения скорости движения потока или расхода на объекте контроля без сравнения с известными данными говорить о наличии отложений мы не можем. Контролируемым пара-

Таблица 1. Виды отложений в трубопроводах в зависимости от транспортируемой среды

Вода	Нефть
<i>Основные виды отложений на внутренних стенках трубопроводов</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • минеральные; • выпадение карбоната кальция из транспортируемой воды; • агрессивное действие транспортируемой воды на внутреннюю поверхность металлических труб; • биологическое обрастание; • выпадение взвешенных веществ 	<ul style="list-style-type: none"> • асфальтены, смолы, парафины
<i>Основные факторы, влияющие на отложения</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • физико-химические свойства транспортируемых вод; • условия эксплуатации сети; • продолжительность службы трубопроводов 	<ul style="list-style-type: none"> • физико-химические свойства перекачиваемой нефти; • изменение температурного режима (охлаждение) нефти в процессе перекачки; • изменение содержания растворенных газов; • гидродинамические условия перекачки
<i>Основное влияние отложений на процесс измерений</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • ослабление уровня сигнала; • увеличение ложных сигналов отражения от минеральных отложений; • отклонение основного луча от оси измерений; • увеличение погрешности измерения скорости потока 	<ul style="list-style-type: none"> • ослабление уровня сигнала; • увеличение погрешности измерения скорости потока

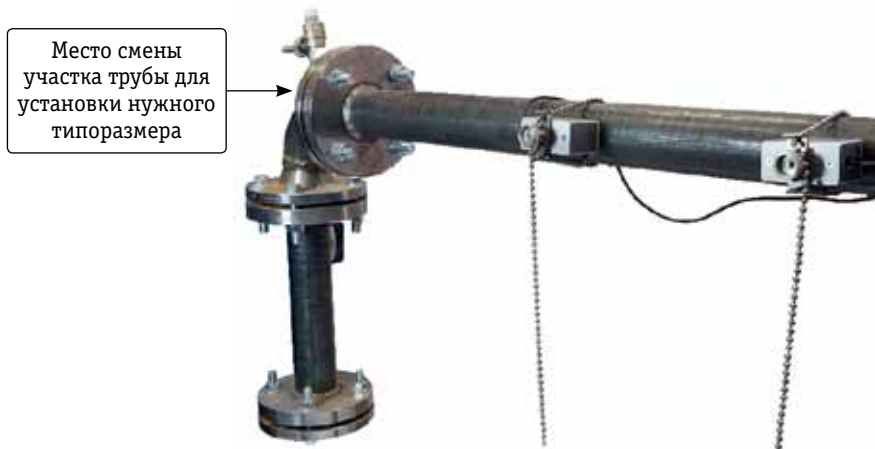


Рис. 5. Часть макета установки пролива для труб с имитацией отложений

метром является скорость ультразвука в исследуемой жидкости. В настоящий момент на базе ООО «Константа УЗК» и организации интегратора «Руна» создается база образцов труб с отложениями. В рамках совместной работы будет создана установка по имитации условий заужения трубопроводов с диапазоном труб от дюймового диаметра до размера трубы, где влияние отложений не вносит существенных поправок. Предположительно диаметр труб может достигать до 325 мм. На рис. 5 представлена действующая установка пролива и имитации наличия отложений, созданная специалистами ООО «Константа УЗК». Номинальный диаметр контроля рассчитан на диаметр от 25 до 108 мм.

Макет представляет собой отрезок трубы из материала объекта контроля, заполненный исследуемой средой. На трубу устанавливаются накладные преобразователи, подключенные к расходомеру. Схема установки выбирается, исходя из возможности установки преобразователей и размеров макета. Определяется скорость рас-

пространения ультразвуковых колебаний в исследуемой среде. Как видно из формулы (3), скорость ультразвуковых колебаний зависит от угла призмы, скорости распространения ультразвука в призме ПЭП и от внутреннего диаметра трубы. С помощью расходомера определяется время, которое прошла ультразвуковая волна через систему, при этом исключаем время прохождения в призме преобразователя и в стенке трубы.

$$c = \sqrt{\frac{1 \pm \sqrt{1 - 4 \left(\frac{\sin \beta}{c_{np}} \cdot \frac{D}{t} \right)^2}}{2 \cdot \left(\frac{\sin \beta}{c_{np}} \right)^2}}, \quad (3)$$

где t – время прохождения ультразвука; c_{np} – скорость распространения ультразвука в призме ПЭП; D – внутренний диаметр трубопровода; β – угол призмы ПЭП.

$$t = T - t_{np} - t_m, \quad (4)$$

где T – время распространения ультразвука, измеренное расходомером,

мкс; t_{np} – пробег в призме ПЭП, мкс; t_m – время распространения ультразвука в стенке трубы, мкс.

Результатом данных расчетов является зависимость скорости распространения ультразвука от толщины отложений (рис. 6а), так как при наличии дополнительной границы меняется расстояние и время, которое необходимо волне для прохождения. Данный расчет был сделан для стальной трубы диаметром 108 мм с толщиной стенки 4 мм и водой в качестве транспортируемой среды. При анализе полученных результатов можно сказать следующее: если при проведении измерений скорости в воде расходомер показывает 1540 м/с, а при температуре 20 °С скорость в воде 1480 м/с, то необходимо либо проверить температуру транспортируемой жидкости, либо предположить наличие отложений и ввести поправочные значения. В этом и заключается предложенный метод.

Для подтверждения справедливости данного метода были проведены исследования на теплоснабжающих предприятиях, а также предприятиях, обслуживающих магистрали «сырой» и товарной нефти. Исходя из результатов исследования, данный метод может быть рекомендован для применения, но с проведением предварительных исследований типа и свойств отложений, характерных для конкретных объектов контроля.

Литература

1. Чичиров А. А., Чичирова Н. Д., Ляпин А. И., Закиров Р. Н., Виноградов А. С. Образование отложений и коррозия на внутренней поверхности трубной системы открытой теплосети // Новости теплоснабжения. 2015. № 1.
2. Биргер Г. И., Бражников Н. И. Ультразвуковые расходомеры // Издательство «Металлургия». М., 1964.
3. Руководство по эксплуатации РУНС.170.00.000 РЭ «Расходомеры ультразвуковые КАТФЛОУ» ООО ПК «РУНА». 2014.
4. Технические условия ТУ 421392-041-96800231-2016 «Ультразвуковые преобразователи для расходомеров» // ООО «Константа УЗК». 2016.

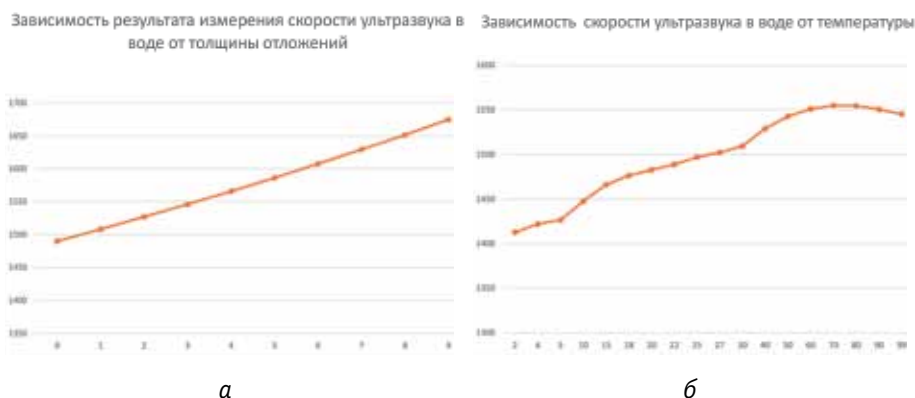


Рис. 6. Зависимость скорости распространения в воде: а – от толщины отложений; б – от температуры

П.В. Попова, ведущий инженер,
 ООО «Константа УЗК», г. Санкт-Петербург,
 тел.: +7 (812) 336-4047,
 e-mail: mail@constanta-us.com,
 сайт: www.constanta-us.com