

НОВЫЕ МЕТОДИКИ ДЛЯ АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИИ ПРИ ТЕПЛОВОМ КОНТРОЛЕ ТРУБОПРОВОДОВ

В. А. СТОРОЖЕНКО, С. И. МЕЛЬНИК, Ю. А. КУХАРЕВ

Несмотря на впечатляющие достижения конца XX века, у трубопроводного транспорта еще есть проблемы, которые не имеют научного и технического решения. Ученые наметили около семисот задач, которые нужно решить в первой половине столетия для процветания человечества. В их число вошли и проблемы трубопроводного транспорта.

Сегодня требуется выявлять следующие дефекты трубопроводов: расслоения в витых трубах, трещины из-за непроваров, коррозии или других причин, утечки, отклонения диаметра и толщины стенок трубы от заданных в нормативной документации (например, вследствие коррозии или отложений пыли), незаконные врезки в трубопровод. Часто требуется нанесение на карту места расположения (трассировка) трубопровода. Специфической проблемой погруженных трубопроводов в болотистой местности является их всплытие. Дело в том, что грунт не может зафиксировать трубу на нужной глубине, что приводит к изгибам в вертикальной плоскости, возникновению напряжений и в конечном счете — к разрыву трубы [1].

Развитие трубопроводного транспорта выдвигает новые требования к информативности проводимого контроля. Условно можно наметить два основных направления: упреждение возможности аварий (выявление дефектов на ранних стадиях развития) и оценку параметров дефекта в процессе контроля, его природы и причин возникновения, а также наносимого дефектом ущерба. Второе направление является диагностикой трубопроводов.

В настоящее время для определения дефектов в трубопроводах наиболее часто используются следующие методы: ультразвуковой, тепловой, визуальный, магнитовихревой, акустической эмиссии [2]. Каждый из них в отдельности не лишен недостатков, поэтому наиболее эффективной является комбинация методов. Например, в условиях производства для контроля трубы можно использовать ультразвуковой метод при предварительном выявлении внутренних дефектов с последующим рентгенографическим контролем аномальных мест для уточнения результатов [2]. Для контроля больших участков газопровода рационально применять тепловой метод с использованием лазерного анализатора спектра. При утечке газа из подземного трубопровода происходит охлаждение этого участка, которое можно зарегистрировать тепловизором. Но в то же время такую же температурную аномалию может вызвать и неоднородность грунта. Чтобы избежать неоднозначности, применяется газоанализатор, который с высокой точностью регистрирует наличие метана в атмосфере. Работы в этом направ-

лении успешно проводятся в Харьковском филиале УкрНИИгаза, а также и в России.

Сущность задач тепловой диагностики трубопроводов. По формальным признакам тепловая диагностика отличается от дефектотрии тем, что в первом случае требуется не только определение наличия дефекта и его параметров, но и заключение о работоспособности, остаточном ресурсе работы системы, ее опасности для окружающих и об ущербе, который наносит данный дефект. Эффективное проведение тепловой диагностики невозможно без глубокого анализа тепловых процессов, протекающих в объекте контроля (ОК), оптимизации на этой основе процесса контроля и создания моделей, адекватных протекающим в ОК процессам. Заключение о работоспособности системы невозможно сделать без знания теории прочности и усталостных разрушений. Физическая сущность метода тепловой диагностики основывается на фундаментальных положениях теплофизики, теории обработки и передачи информации, метрологии. Процедура проведения тепловой диагностики можно условно разделить на следующие этапы:

1. Получение необходимой исходной априорной информации об объекте контроля (параметры грунта, объекта контроля).

2. Получение данных с регистрирующих устройств (тепловизора, газоанализатора) и их первичная обработка (выявление наличия аномалии); обработка полученной информации и заключение о характере и параметрах дефекта и о работоспособности системы.

Априорную информацию получают перед началом проведения непосредственных измерений. К ней относится предварительное расположение трубопровода, его диаметр, давление и характер транспортируемого вещества, параметры грунта и многое другое. На втором этапе регистрируют тепловое поле на поверхности грунта при помощи тепловизора. Схема проведения второго этапа диагностики представлена на рис. 1. Трубопровод является источником первой составляющей теплового потока с поверхности грунта. Вторая составляющая обусловлена взаимодействием атмосферы с грунтом. Совместно эти два потока формируют температурное поле на поверхности. В случае утечки появляется третья составляющая, вызванная наличием вытекающего вещества. Через некоторое время в системе устанавливается тепловой баланс, то есть система входит в стационарный режим (рис. 2).

При проведении тепловой диагностики требуется решать обратную задачу теплопроводности: по температурному распределению на поверхности искать параметры объекта контроля. Данная задача является неустойчивой по отношению к малым ко-

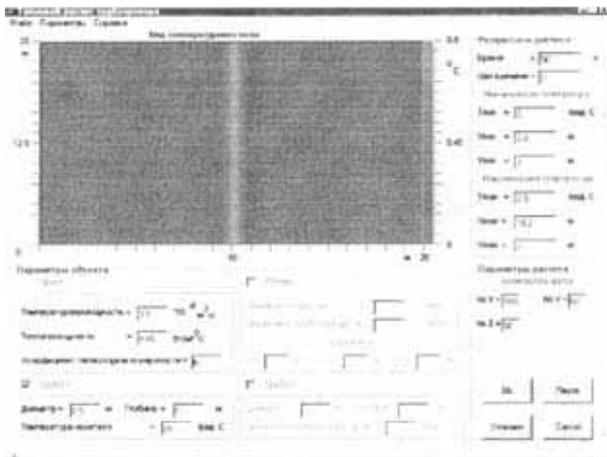


Рис. 2. Пример расчета температурного поля при помощи компьютерного моделирования.

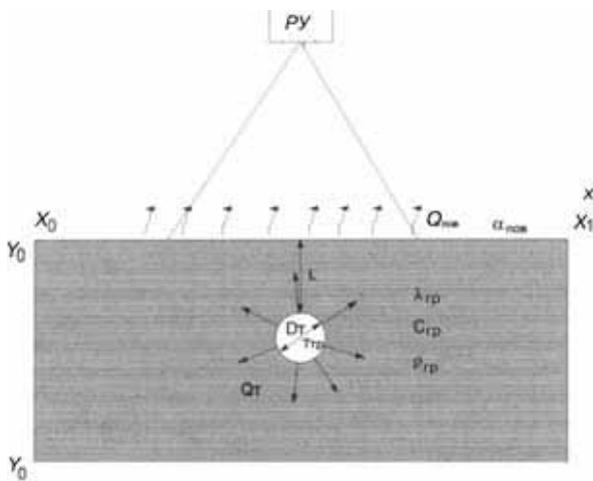


Рис. 1. Схема проведения второго этапа контроля трубопровода (РУ — регистрирующее устройство; $D_{т}$, $T_{тр}$ — диаметр и температура трубы; $Q_{т}$, $Q_{пов}$ — мощность теплового потока, выделяемого трубой и поверхностью; $\lambda_{гр}$, $C_{гр}$, $\rho_{гр}$ — соответственно коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность грунта; $\alpha_{пов}$ — коэффициент теплоотдачи поверхности).

лебаниям входного параметра (температуры). Так, например, причиной одного и того же распределения температуры могут служить две трубы с разным диаметром и температурой, проложенные на различной глубине, то есть имеющие различные параметры. В настоящее время существует два основных подхода к решению обратных задач теплопроводности:

1. Использование способов, основанных на аппроксимации геометрического распределения ТФХ в дефектных структурах гладкими функциями с последующей заменой исходного дифференциального уравнения более простым.
2. Решение группы прямых задач с последующим сближением экспериментальных и расчетных данных [4].

Аналитическое прямое решение задачи возможно только для ограниченного круга простых объектов. Найти его для данного случая достаточно затруднительно. Вторым способом для решения задачи являются численные методы (например, метод конечных разностей). В нашей лаборатории разработана компьютерная программа под Windows «Тру-

бопровод», позволяющая по задаваемым параметрам трубопровода, дефекта и грунта определять температурное распределение на поверхности грунта. В программе можно также задать начальное распределение температуры в грунте. Она также позволяет просматривать распределение температуры на различной глубине, в различных плоскостях и моментах времени. В программе также можно использовать точечные источники тепла, которые моделируют утечки жидких продуктов. Но такая модель не подходит для моделирования утечек газа из газопроводов большого давления, поэтому для такого дефекта она была разработана в УкрНИИГаза, где были проведены исследования в области определения утечек в газопроводах.

Программа «Трубопровод» тоже позволяет решать обратную задачу используя градиентный метод минимизации функционала. Проведена также работа по минимизации функционала с учетом шумов и характеристик объекта, что позволяет сократить количество итераций решений прямой задачи.

Как показал опыт использования компьютерной программы, точность ее результатов ограничена количеством шагов при проведении расчетов. В нашей программе использовалась сетка с количеством шагов $100 \times 50 \times 50$. Устойчивая работа программы при этом наблюдается на компьютере не ниже Pentium-I-200 с ОЗУ не ниже 32 МБ. Желательно наличие ОЗУ с объемом 64 МБ. На один шаг расчета при этом уходит около 7 мин, что, естественно, исключает работу программы в реальном режиме. Точность вычислений можно повысить используя симметричность тепловой модели. Проводя расчет только одной половины модели и используя соответствующие граничные условия, можно увеличить либо точность, либо скорость измерений. Однако такое упрощение возможно только в отдельных случаях.

Вторым ограничением решения обратных задач методом перебора прямых решений является невозможность варьирования более 1–2 исходными параметрами, что ограничивает возможность учета всех параметров и нахождения решений. В связи с этим остаются нерешенными такие проблемы, как оценка границ применимости тепловых методов к различным объектам трубопроводного транспорта и различным видам дефектов, а также определение минимальных размеров дефектов, выявляемых тепловыми методами.

Перспективными методами решения обратных задач, которые в последнее время находят все большее признание, являются численно-аналитические. Они во многом свободны от недостатков, свойственных численным методам. Большой опыт в решении задач теплопроводности накоплен в лаборатории теплового контроля Харьковского государственного технического университета радиоэлектроники. При помощи численно-аналитического метода решена задача определения дефектов в материалах в случае двух- и трехмерной модели при активном тепловом контроле [3].

При решении обратной задачи для учета теплоотдачи с поверхности по закону Ньютона нами предложена методика адаптации модели ОК. Ее сущ-

ность заключается в том, чтобы влияние поверхности смоделировать дополнительным распределенным по ней источником тепла с поверхностной плотностью

$$Q_{\text{пов}}(r, t) = 2\alpha_{\text{ст}}[T_{\text{ст}}(r, t) - T_{\text{о.с}}],$$

где $T_{\text{о.с}}$ — температура окружающей среды.

Таким образом, используемая модель ОК, которая включает дополнительный распределенный источник тепла на наблюдаемой поверхности, адаптируется в зависимости от результатов измерений (схема с обратной связью). Используя данный метод, получено уравнение, аналитически связывающее тепловое распределение на поверхности грунта с параметрами трубопровода.

ВЫВОДЫ

1. При контроле трубопроводов наиболее эффективной является комбинация нескольких методов контроля. Тепловой является важной составной частью контроля, имеющей большие перспективы развития ввиду возможности эффективного выявления дефектов в трубопроводах большой протяженности.

2. В настоящее время разработаны тепловые модели бездефектного трубопровода и дефекта типа утечка, реализована компьютерная программа, позволяющая решать обратную задачу при тепловом контроле методом конечных разностей с использованием градиентного метода минимизации функционала.

3. До сих пор не решены многие проблемы, связанные с решением обратной задачи теплового контроля, что требует создания новых методик как альтернативы численным методам (например, численно-аналитических).

1. *Иванцов О.* Время идет — проблемы остаются // Нефтегазовая вертикаль. — 1998. — № 4.
2. *Сергеев А. В., Мозговой А. В.* Комплексный подход к поиску утечек воды // III Укр. научно-техн. конф. «Неруйнівний контроль та технічна діагностика»: Зб. наук. праць. — Дніпропетровськ, 2000. — С. 201.
3. *Шевченко И. Я.* Неразрушающий контроль труб большого диаметра // II Укр. научно-техн. конф. «Неруйнівний контроль та технічна діагностика»: Зб. наук. праць. — Дніпропетровськ, 1997. — С.181.
4. *Орел Р. П.* Тепловая дефектометрия и томография изделий с локальными неоднородностями. — Дис. ... канд. техн. наук. — Харьков, 2000. — 154 с.

Харьков. гос. техн. ун-т радиотехники

Поступила в редакцию
11.12.2000



МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

24–28 сентября 2001

Россия, Волгоград

СЛОИСТЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ-2001

Т е м а т и к а

- Физико-химические основы соединения разнородных материалов
- Математическое моделирование и механика композиционных материалов
- Автоматизированные методы проектирования композиционных материалов, узлов
- Структура и свойства слоистых композиционных материалов
- Технология получения слоистых композиционных материалов
- Технологическое оборудование и методы контроля

Тел.: (8442) 349941, 340642, 341600

Факс: (8442) 349941, E-mail: lysak@vstu.zu, weld@vstu.zu