

УДК 539.3

О. А. Логинов, А. Н. Мисейко

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
УЧАСТКА МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА С ТРЕЩИНОПОДОБНЫМ
ДЕФЕКТОМ**

Исследуется напряжённно-деформированное состояние участка магистрального трубопровода, вызванное скачкообразным развитием трещиноподобного дефекта. Для этого используется математическая модель участка трубопровода, построенная с помощью метода конечных элементов. Полученные результаты позволяют сформировать требования к методам и средствам для определения развивающихся трещиноподобных дефектов магистральных трубопроводов.

Магистральные трубопроводы (МТ) имеют огромное значение для российской экономики — по ним транспортируется 100 % добываемого газа, 98 % нефти и 50 % продукции нефтепереработки. Однако большая часть российских МТ была построена в 60–80-е годы прошлого века и на сегодняшний день находится в стадии износа, что ведёт к увеличению риска аварий и отказов при эксплуатации [1].

Анализ аварий, произошедших на МТ за последние годы, показывает, что их причиной являются дефекты различных типов, среди которых чаще всего встречается коррозия (55,3 %) и трещиноподобные дефекты (17,7 %) [2]. К последнему типу относятся трещины, а также такие дефекты сварных соединений как непровары, несплавления и подрезы. Общими признаками для них являются малая (по сравнению с протяжённостью) величина раскрытия и малый радиус в вершине, характерные для трещин, благодаря чему они и получили свое название.

В отличие от коррозии трещиноподобные дефекты могут привести к быстрому и внезапному разрушению МТ [1, 2]. Наиболее вероятно их возникновение и развитие на участках, испытывающих сложные и интенсивные нагрузки: высокие статические и изгибающие напряжения, пульсации давления, температурные перепады, подвижки грунтов и т. п. Для этих участков задача выявления развивающихся трещиноподобных дефектов имеет особое значение.

Результаты исследования напряжённно-деформированного состояния (НДС) дефектного участка позволят оценить реакцию участка МТ на возмущение, получаемое при развитии трещиноподобного дефекта, выделить информативные параметры процесса, сформировать требования к чувствительности методов и средств для обнаружения подобных дефектов.

Описание процессов, возникающих в различных конструкциях, под действием изменяющихся во времени сил может быть получено аналитическим и численным способами. Однако первый практически невозможно использовать для реальных объектов ввиду сложных граничных условий. Для моделирования подобных задач следует использовать численные методы, хорошо развитые и активно используемые в последнее время. При выборе конкретного метода необходимо учитывать не только эффективность математической процедуры вычисления, но и возможности самого программного продукта контролировать процесс расчёта и проводить верификационные испытания. Совершенствование вычислительной техники даёт возможность применять этот подход при решении различных инженерных задач. В настоящей работе предлагается использовать метод конечных элементов (МКЭ), широко распространённый для расчёта различного рода конструкций. Общепринятая формулировка МКЭ предполагает отыскание поля перемещений и связана с минимизацией потенциальной энергии системы при нахождении узловых значений перемещений. После того как перемещения будут найдены, вычисляются компоненты тензоров деформаций и напряжений.

Для расчёта НДС был использован пакет конечно-элементного анализа ANSYS [3].

На первом шаге была построена геометрическая модель участка МТ. Для примера была выбрана труба с размерами 1020×12 мм.

На втором шаге было проведено разбиение поверхности участка МТ на оболочечные конечные элементы. Исходя из возможного вклада погрешности модели в итоговые результаты и учитывая имеющиеся вычислительные ресурсы, производилась некоторая идеализация исходной геометрии. Было создано несколько моделей с различной степенью детализации, из которых была выбрана наиболее оптимальная, состоящая из 150 тысяч конечных элементов, что позволяет достаточно опера-

тивно проводить конечно-элементный расчёт (в пределах 1–4 часов), но в то же время обеспечивает приемлемую точность.

На третьем шаге задавались параметры МТ и условия его нагружения. Были смоделированы следующие условия: глубина залегания МТ — 1 м, свойства грунта выбирались согласно [4], также учитывалось сцепление стенок МТ с грунтом. Предполагалось, что внутри трубопровода находится газообразная среда. Материал, из которого изготовлен МТ — низколегированная трубопроводная сталь 09Г2С (модуль Юнга $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, предел текучести $\sigma_T = 0,37 \cdot 10^9$ Па). Поведение материала при проведении расчётов принималось упругим, а нагружение — динамическим.

Скачок трещиноподобного дефекта в материале МТ моделировался приложением единичного ступенчатого импульса в области площадью 1 см^2 . При этом длительность импульса в 10^{-5} Па составляла 0,0001 с, а максимальная величина давления на поверхности МТ в указанной области — $2 \cdot 10^4$ Па, что соответствует значениям параметров скачков трещиноподобных дефектов, наблюдаемых при испытаниях реальных объектов [5].

После построения математической модели участка МТ был проведён расчёт его НДС. Время расчёта зависит от таких параметров, как общее число элементов, число контактирующих элементов, величина шага по нагружению, число подшагов и максимально допустимое число равновесных итераций на каждом подшаге [3].

Результаты расчёта представлены на рис. 1 и 2. На рис. 1 показано распределение полей перемещений (в мм) на поверхности участка МТ длиной 10 м в последовательные моменты времени, прошедшие с момента действия возмущения (скачка дефекта). На рис. 2 приведена зависимость амплитуды смещения точек поверхности (в мм) участка МТ от времени (в мс). Значения амплитуды показаны для трёх возможных направлений распространения колебаний — X , Y , Z . Из представленных рисунков видно, что с увеличением расстояния от точки приложения нагрузки происходит уменьшение амплитуды колебаний более чем в 2 раза. Значения амплитуды колебаний в точке на рас-

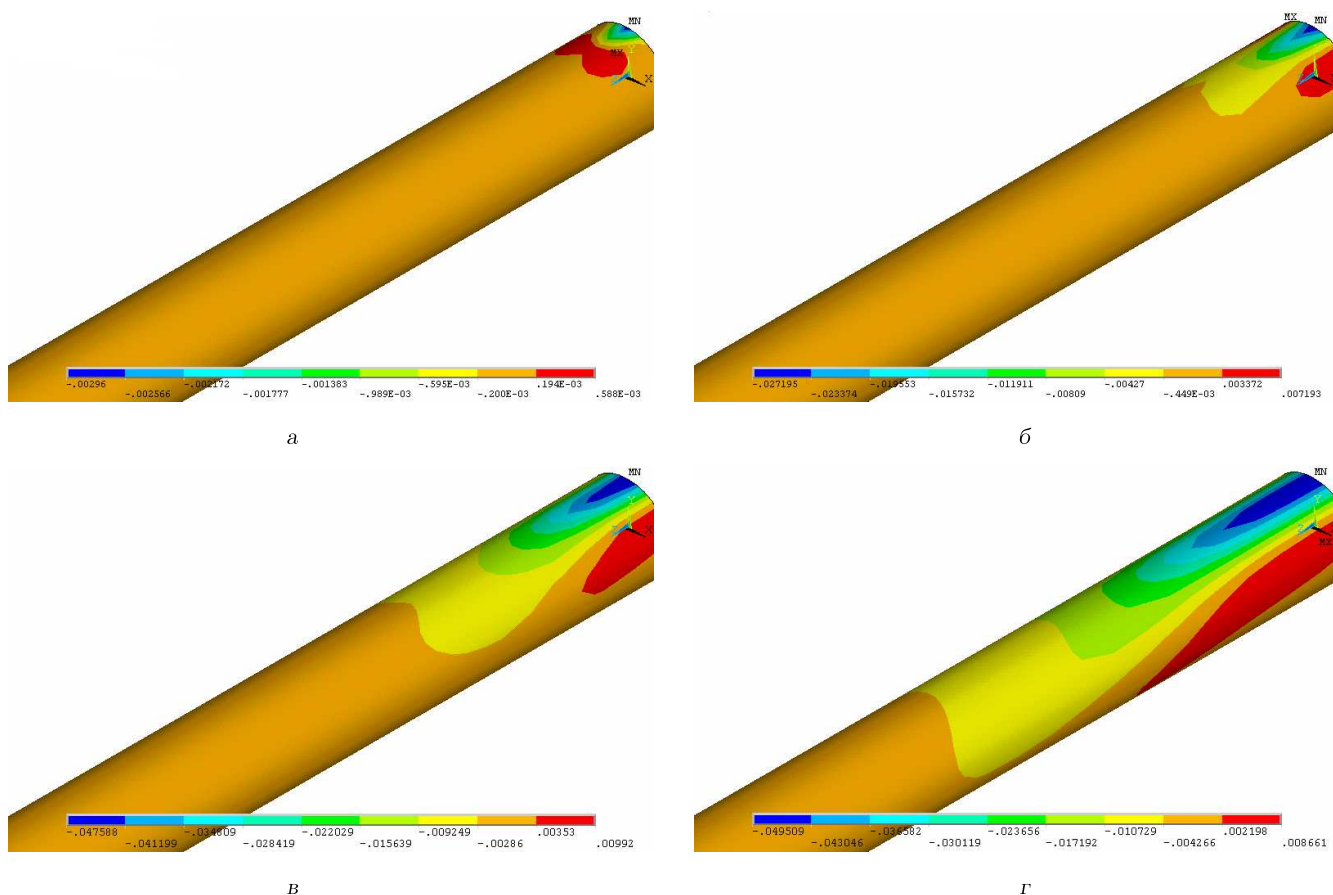


Рис. 1. Распределение полей перемещений (в мм) на поверхности участка МТ ($l = 10$ м): а — в момент времени 0,002 с; б — в момент времени 0,0195 с; в — в момент времени 0,165 с; г — в момент времени 0,650 с

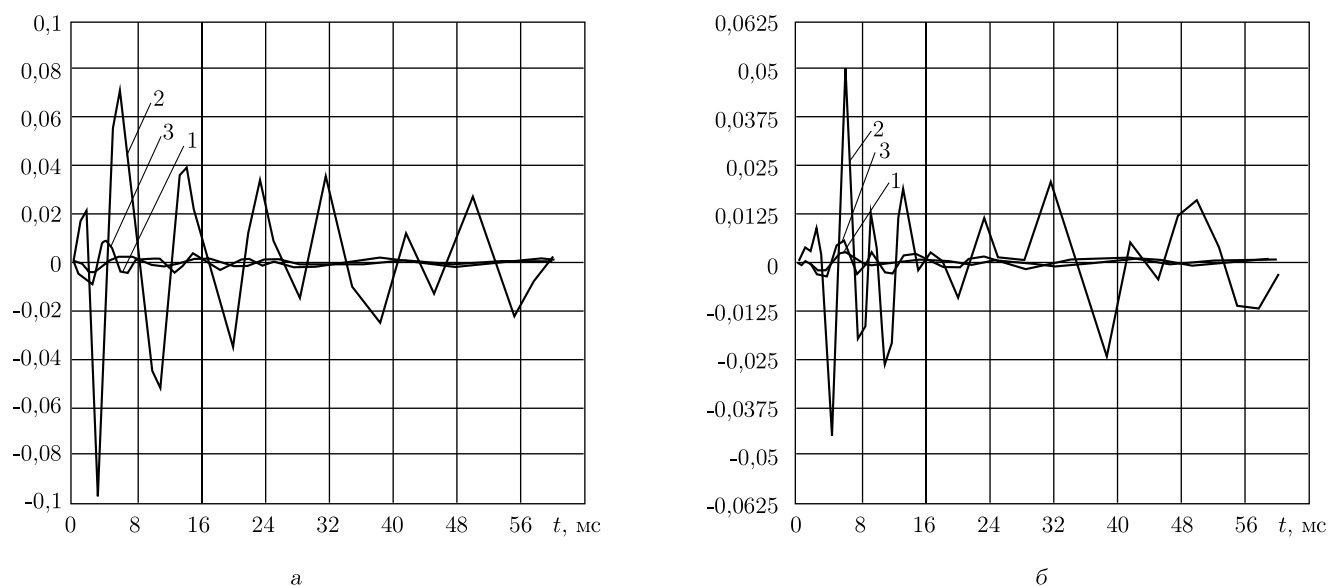


Рис. 2. Зависимость амплитуды смещения точек поверхности (в мм) участка МТ от времени (в мс): а — на расстоянии 10 м от трещиноподобного дефекта; б — на расстоянии 20 м от трещиноподобного дефекта. Цифры: смещения в горизонтальном (1) и вертикальном (2) направлениях перпендикулярно оси МТ и вдоль оси (3)

стоянии 30 м от источника возмущения определяют пороговую чувствительность методов и средств, использующих для выявления трещиноподобных дефектов смещение поверхности МТ. Существующие пьезоэлектрические преобразователи имеют пороговую чувствительность, равную найденным значениям радиального смещения — 10 мкм.

Анализ конечно-элементной модели позволяет определить и описать отклик участка МТ от скачка трещиноподобного дефекта. Характер затухания амплитуды колебания от источника возмущения позволяет оценить возможную дальность определения местоположения источника, исходя из чувствительности имеющихся технических средств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Безопасность трубопроводного транспорта [Текст] / И. И. Мазур, О. М. Иванцов и др. — М.: МГФ «Знание», 2002. — 629 с.
2. Коршак, А. А. Обеспечение надёжности магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов [Текст] / А. А. Коршак, Г. Е. Коробков, В. А. Душин, Р. Р. Набиев. — Уфа: Фонд содействия развитию научных исследований, 2003. — 190 с.
3. Каплун, А. Б. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство [Текст] / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Ольферьева. — М.: Едиториал УРСС, 2003. — 272 с. — ISBN 5-354-00238-9.
4. СНиП 3.02.01-87 Земляные сооружения, основания и грунты. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. — 88 с.
5. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. [Текст] / Под общ. ред. В. В. Клюева. — Т. 7: В 2 кн. Кн. 1: В. И. Иванов, И. Э. Власов. Метод акустической эмиссии. — М.: Машиностроение, 2005. — 829 с.

ОАО «ОргЭнергоНефть» Самарский филиал, Самара
stru@imach.uran.ru

Поступила 15.01.2008

О. А. Loginov, A. N. Miseyko

MODELLING OF STRESS DISTRIBUTION IN THE ZONE OF MAIN PIPELINE WITH CRACK-LIKE DEFECT

A finite element model for behaviour of zone of main pipeline is proposed. It is shown that presented model can be used for the determination of optimal parameters of detecting system.

ОАО "OrgEnergoNeft" Samara branch, Samara, Russia
stru@imach.uran.ru

Received 15.01.2008