

УДК 621.64:539.4

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ПОДЗЕМНОЙ ТРУБОПРОВОДНОЙ СИСТЕМЫ

© 2011 К.А. Цапурин, Ю.В. Скворцов, С.В. Глушков

Самарский государственный аэрокосмический университет

Поступила в редакцию 25.11.2011

Описана методика оценки показателей прочности и надежности подземной трубопроводной системы на базе многоуровневого подхода с использованием различных расчётных моделей. Рассмотрен пример расчета живучести подземного промышленного трубопровода для сбора газоконденсатной смеси.

Ключевые слова: *надежность, живучесть, ресурс, коэффициент интенсивности напряжений, поверхностная трещина, неканоническое разложение*

Как известно, для трубопроводной системы можно использовать различные расчетные схемы. Простейшей из них является балочная модель. Она относится к классу линейных, поскольку здесь геометрия трубопровода представляется его осевой линией. В настоящее время именно эта модель применяется во всех специализированных пакетах прикладных программ, предназначенных для прочностного расчета трубопроводных систем. Следующей по сложности расчетной схемой является оболочечная модель. В этом случае геометрия трубы описывается ее срединной (цилиндрической) поверхностью. И, наконец, самой точной расчетной схемой является объемная модель, когда труба рассматривается как трехмерное тело. Следует отметить, что при переходе от балочной модели к оболочечной, а также от последней к объемной число степеней свободы (т.е. количество неизвестных перемещений) возрастает на порядок, поэтому использование оболочечной модели (и тем более объемной) для всего трубопровода в настоящее время представляется труднореализуемым.

В данной работе предлагается использовать многоуровневый подход к анализу напряженно-деформированного состояния продуктопроводов. Суть его заключается в следующем. На первом этапе рассматривается вся трубопроводная система, для которой строится балочная модель. С ее помощью выявляется

наиболее опасный участок трубопровода, где возникают максимальные напряжения. Далее, на втором этапе, рассматривается только этот участок. Для него строится уже оболочечная модель (называемая подмоделью первого уровня). В концевых сечениях данного участка прикладываются перемещения (линейные и угловые), найденные на первом этапе, т.е. с помощью балочной модели. На последнем (третьем) этапе рассматривается лишь фрагмент стенки трубы, где имеется дефект или возможно его появление. Для данного фрагмента строится объемная модель (подмодель второго уровня). При этом в качестве граничных условий на границе вырезки здесь задаются перемещения, найденные на втором этапе на базе оболочечной модели. Иллюстрация описанного выше подхода представлена на рис. 1. Для его реализации в данной работе применяется универсальный МКЭ-пакет ANSYS.

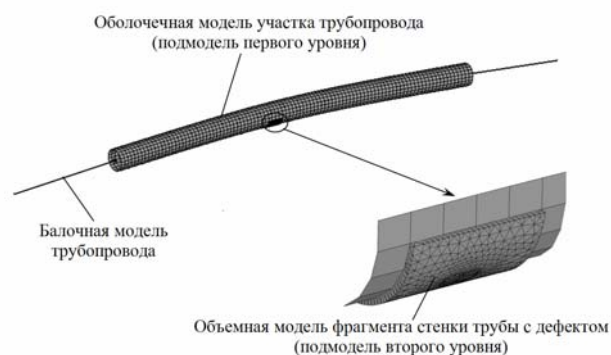


Рис. 1. Многоуровневый подход к расчету трубопроводов

Следует отметить, что из всех возможных в продуктопроводах дефектов, как правило, наибольший интерес представляют несквозные

Цапурин Константин Александрович, аспирант. E-mail: tsapurin@list.ru

Скворцов Юрий Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры прочности летательных аппаратов. E-mail: proch@ssau.ru

Глушков Сергей Валериевич, ассистент кафедры прочности летательных аппаратов. E-mail: GlushkovSergeyV@gmail.com

поверхностные трещины, имеющие полуэллиптическую или близкую к ней форму. В качестве примера рассматривается подземный промышленный трубопровод 114x7 для сбора газоконденсатной смеси, длиной около 4 км. Материал трубы – сталь 20Дс. Для автоматизации процессов построения различных моделей рассматриваемого трубопровода разработаны ANSYS-макросы.

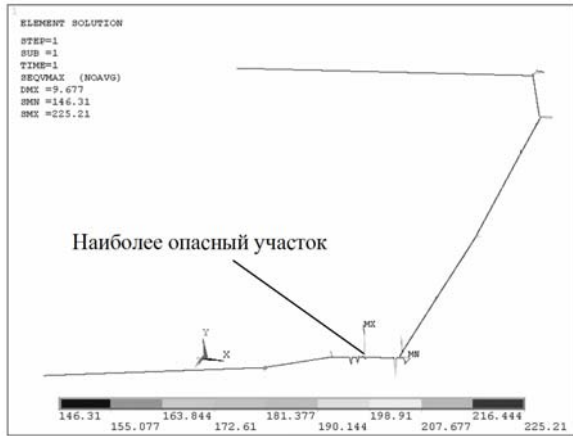


Рис. 2. Наибольшие в сечении эквивалентные напряжения

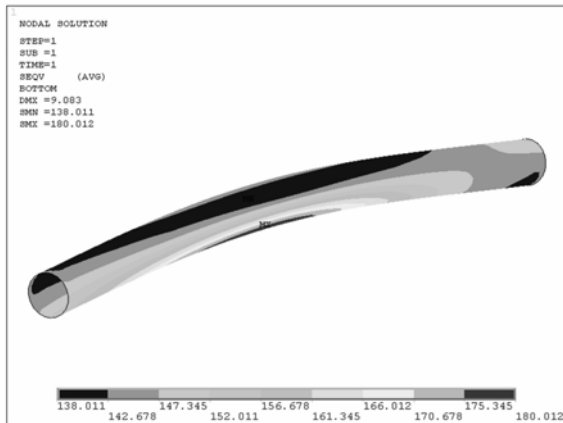


Рис. 3. Поле эквивалентных напряжений для наиболее опасного участка трубопровода

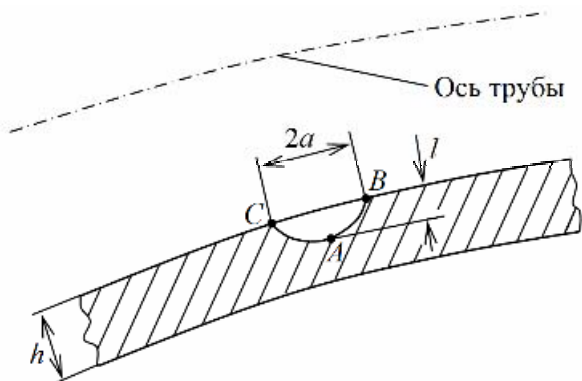


Рис. 4. Осевая внутренняя трещина в стенке трубы

Согласно описанному выше многоуровневому подходу на первом этапе сразу для всей трубопроводной системы строится балочная МКЭ-модель. Соответствующие результаты расчетов изображены на рис. 2, где показано распределение по длине трубопровода наибольших по сечению эквивалентных напряжений по Мизесу. Видно, что максимальные напряжения составляют 225 МПа. Анализ геометрии этого (наиболее опасного) участка трубопровода показывает, что в данном месте имеется небольшой ($2,4^\circ$) излом продольной оси в вертикальной плоскости, причем в чертежах здесь отвод не задан. На втором этапе для уточнения полученных результатов рассматривается только наиболее опасный участок, для которого строится уже оболочечная модель. При этом сглаживание осевой линии трубопровода выполняется с помощью сплайна, проводимого через узлы балочной модели. Поле напряжений по Мизесу в оболочке трубы представлено на рис. 3. Видно, что максимальные напряжения, возникающие на внутренней поверхности в нижней части трубы, составляют всего 180 МПа. На третьем этапе проводится исследование влияния дефекта стенки трубы в виде осевой внутренней трещины, расположенной в нижней части трубы, где имеют место максимальные напряжения (рис. 4). Глубина трещины l принята равной 3 мм, а полуширина a – 5 мм. В таблице 1 представлены рассчитанные значения коэффициентов интенсивности напряжений в точках A , B и C фронта трещины, соответствующие трем основным типам деформирования при растрескивании.

Таблица 1. Коэффициенты интенсивности напряжений ($\text{Н/мм}^{3/2}$)

| Точка | K_I | K_{II} | K_{III} |
|-------|-------|----------|-----------|
| A | 366,3 | 3,0 | 9,8 |
| B | 330,4 | 16,0 | 6,9 |
| C | 321,3 | 7,8 | 3,4 |

При оценке живучести рассматриваемой трубопроводной системы с трещиной предполагается, что действующее на трубу внутреннее давление представляет собой стационарный случайный процесс $p(t)$ с математическим ожиданием $\langle p(t) \rangle = 20$ МПа, дисперсией $D[p(t)] = (0,1 \langle p(t) \rangle)^2$, корреляционной функцией

$$K_p(\tau) = D[p(t)] \frac{\sin \omega_c \tau}{\omega_c \tau}$$

и спектральной плотностью

$$S_p(\omega) = \frac{D[p(t)]}{\omega_c} \quad (0 \leq \omega \leq \omega_c)$$

где $\omega_c=40$ рад/с – предельная круговая частота.

Данные корреляционная функция и спектральная плотность изображены на рис. 5 сплошными линиями. Идеализация рассматриваемого случайного процесса проводится методом интерполяционных полиномов с использованием неканонического разложения, согласно которому k -реализация случайного процесса $p(t)$ записывается в виде [1]:

$$p_k(t) = \langle p(t) \rangle + \gamma_{k_\gamma} \sin \omega_{k_\omega} + \delta_{k_\delta} \cos \omega_{k_\omega} \\ (k = 1 \dots q; \quad q = q_\gamma q_\delta q_\omega),$$

где $\langle p(t) \rangle$ – математическое ожидание процесса, $q_\gamma, q_\delta, q_\omega$ – числа узлов интерполяции случайных величин неканонического разложения γ, δ, ω .

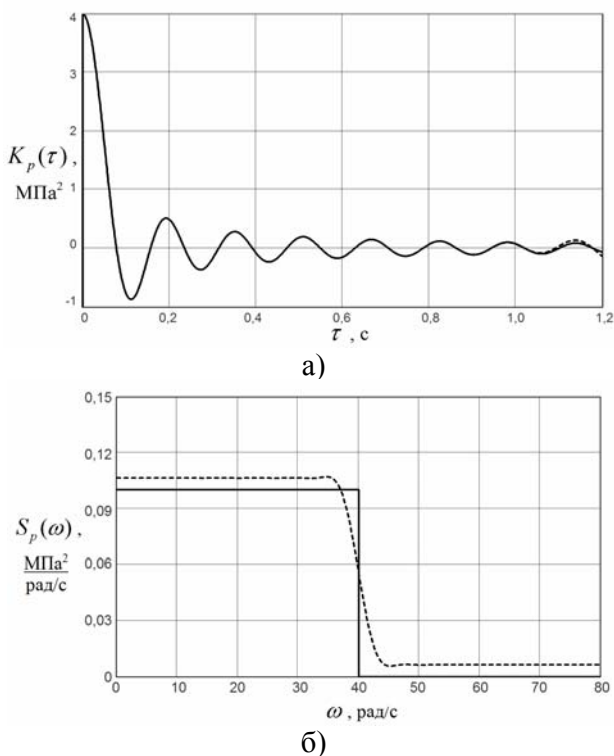


Рис. 5. Корреляционная функция (а) и спектральная плотность (б)

Рассчитанные методом интерполяционных полиномов значения корреляционной функции и спектральной плотности при $q_\gamma = q_\delta = 2, q_\omega=14$ представлены на рис. 5 штриховыми линиями. Видно, что выбранное количество узлов интерполяции переменных γ, δ, ω обеспечивает достаточно точную аппроксимацию

корреляционной функции. При $q_\gamma=q_\delta=2$ узлы λ_{k_γ} и λ_{k_δ} будут принимать значения ± 1 , и все реализации случайного процесса $p(t)$ будут иметь одинаковую амплитуду:

$$A_p = \sqrt{\gamma_{k_\gamma}^2 + \delta_{k_\delta}^2} = 2,83 \text{ МПа}$$

Минимальное и максимальное значения давления также будут постоянными во всех реализациях:

$$p_{\min} = \langle p(t) \rangle - A_p = 17,17 \text{ МПа};$$

$$p_{\max} = \langle p(t) \rangle + A_p = 23,83 \text{ МПа}$$

Учитывая это, можно заранее рассчитать минимальные и максимальные значения коэффициента интенсивности напряжений K_I в отдельных точках фронта трещины для различных значений отношений l/a и l/h при действии соответственно давления p_{\min} и p_{\max} (температурные и гравитационные нагрузки остаются неизменными). Аналитические зависимости $K_I^{\min}(l/a, l/h)$ и $K_I^{\max}(l/a, l/h)$ для точек A и B находятся с помощью интерполяции табличных данных полиномами Лагранжа. Для оценки функции надежности в момент времени t здесь используется формула модели цепи [1]. При этом прогнозирование роста полуэллиптической трещины осуществляется по формулам Пэриса [1]. Решение прекращается, если функция надежности $H(t)$ окажется меньше наперед заданной нормативной величины H^{norm} . Результаты решения рассматриваемой задачи представлены на рис. 6 и 7, где показаны зависимости математических ожиданий размеров трещины и максимальных значений коэффициента интенсивности напряжений в точках A и B , а также зависимость функции надежности от времени эксплуатации.

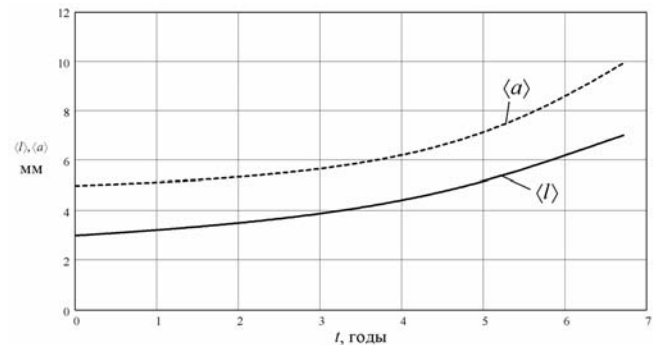


Рис. 6. Зависимости математических ожиданий размеров трещины

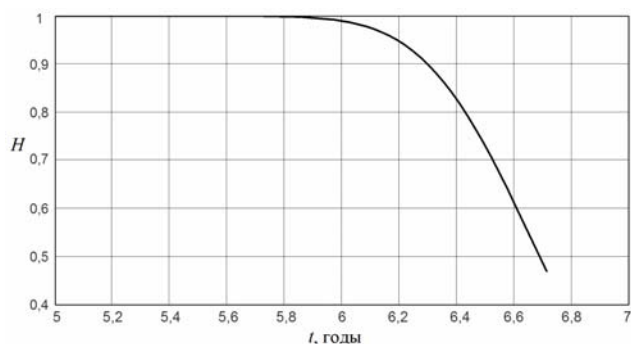


Рис. 7. Функция надежности

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Перов, С.Н. Обеспечение надёжности трубопроводных систем / С.Н. Перов, С.И. Аграфенин, Ю.В. Скворцов, Ю.Л. Тарасов. – Самара: ООО «Издательство СНЦ», 2008. 246 с.

ESTIMATION OF INDEXES OF DURABILITY AND RELIABILITY OF UNDERGROUND PIPELINE SYSTEM

© 2011 K.A. Tsapurin, Yu.V. Skvortsov, S.V. Glushkov

Samara State Aerospace University

The method of estimation of indexes of durability and reliability of underground pipeline system on the basis of the multilevel approach with use of various settlement models is described. The example of calculation the survivability of the underground trade pipeline for gathering gas and condensate mixture is considered.

Key words: *reliability, survivability, resource, strength intensity coefficient, surface crack, non-canonical decomposition*