

М. Х. Сабитов, С. И. Поникаров

ФРАГМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КРИВОЛИНЕЙНЫХ УЧАСТКОВ ТРУБОПРОВОДОВ С УЧЕТОМ ДЕФЕКТОВ ФОРМЫ

Ключевые слова: трубопровод, отвод, овальность.

Рассмотрена задача расчетного анализа отдельных фрагментов трубопровода с использованием метода конечных элементов. Задача решается на примере криволинейных отводов с использованием результатов решения общей стержневой модели трубопровода. Проведен анализ влияния овальности поперечного сечения отводов на прочность трубопровода.

Keywords: pipeline, branch, ovality.

The task of the current analysis of separate fragments of the pipeline is considered. For the current analysis using finite element method. The problem is solved on the example of branches with use of results of the solution of beam model of the pipeline. Influence of ovality of cross section of branches on pipeline durability is analysed.

Расчет на прочность трубопроводных систем различного назначения, таких как трубопроводы пара и горячей воды в энергетике, технологических трубопроводов химических предприятий, газопроводов, осуществляется на основании нормативных документов, использующих, по – сути, одну и ту же классическую методику расчета. Суть методики в представлении трубопровода в виде упругой стержневой системы с учетом реальной гибкости элементов и сил трения в опорах скольжения. Расчетом определяются внутренние усилия, реакции опор и усилия воздействия трубопровода на оборудование для нерабочего (холодного) состояния трубопровода, рабочего состояния и условий испытаний. Таким образом, полный расчет трубопровода состоит из нескольких этапов. Расчет осуществляется с использованием методик и программ, основанных на различных классических и специальных методах решения сложных стержневых систем. Авторы, в частности, используют метод конечных элементов.

Использование стержневой расчетной схемы накладывает ограничения при проведении проверочных расчетов трубопроводов, когда возникает необходимость более детального анализа отдельных элементов, например, локальных эксплуатационных дефектов формы и трещиноподобных дефектов [1], нестыковых сварных соединений [2], нестандартных врезок и т.д. Переход от стержневой расчетной схемы к оболочечной, казалось бы, дает возможность решить данную проблему, но при этом возникает ряд сложностей. Основная сложность заключается в том, что в основу расчета изгибаемых стержней положена гипотеза неизменности формы поперечного сечения стержня при изгибе, когда как в реальности сечение трубы при изгибе становится овальным. Учет уменьшения жесткости криволинейных участков трубопровода – отводов за счет изменения формы сечения при изгибе в нормативной методике расчета учитывается коэффициентом податливости криволинейных труб, используемым при вычислении напряжений стержневой системы.

Для перехода к оболочечной модели выделенного фрагмента трубопровода с использованием результатов расчета полной стержневой модели трубопровода возможны два варианта – это использование результатов решения в форме вектора перемещений в узлах стержневых конечных элементов или использование вектора внутренних силовых факторов – сил и моментов в тех же узлах. Первый должен быть более точным, но как уже было отмечено, необходимо учитывать изменение формы сечения трубы при изгибе и внутреннее избыточное давление, что приводит к определенным математическим трудностям при задании перемещений точек срединной поверхности трубы в пространстве.

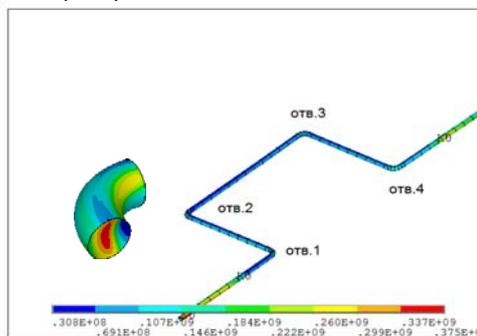


Рис. 1 – Фрагмент трубопровода

Более простое решение можно получить с использованием вектора внутренних сил и моментов в узлах стержневой модели, соответствующих торцевым сечениям выделенного фрагмента. Способ приложения сил (продольной и перерезывающей), а также моментов (изгибающих и крутящих) выбирался из анализа результатов решения простой тестовой задачи. Защемленный с одного торца консольный стержень единичной длины на другом конце нагружался единичными силами и моментами. Задача решалась с использованием стержневой и оболочечной расчетных схем. Поперечное сечение стержня задавалось равным поперечному сечению трубы. При верном приложении сил и моментов результат совпадает с решением по известным формулам практической механики.

Полученное по такой схеме упругое решение оболочечной модели фрагмента трубопровода (рис. 1) с допуском в запас прочности совпадает с соответствующим решением исходной стержневой модели.

Наиболее характерным дефектом длительно эксплуатируемых высокотемпературных трубопроводов является увеличение овальности поперечного сечения отводов. Ниже приводятся результаты расчета отводов П – образных компенсаторов трубопроводов транспортировки водяного пара с учетом овальности поперечного сечения. Рассмотрены два трубопровода пара с расчетными параметрами: $p=3,0$ МПа и $T=280^{\circ}\text{C}$ и $p=3,0$ МПа и $T=220^{\circ}\text{C}$. Конструкция первого трубопровода включает два П – образных компенсатора с отводами труб размером 219x8 мм, второй – один компенсатор с отводами труб размером 108x6 мм, материал отводов - сталь 20.

Результаты расчета для трех компенсаторов приведены на рисунках 2-4. Результирующие напряжения представлены в относительной форме:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_{\text{int}}}{\sigma_T}, \text{ где } \sigma_T - \text{предел текучести стали, } \sigma_{\text{int}} -$$

интенсивность напряжений в отводе (размах интенсивности напряжений в случае упруго – пластического расчета).

По результатам расчета отводы в компенсаторах первого трубопровода, имеющего больший диаметр и расчетную температуру, более нагружены. Рассчитанная интенсивность упругих напряжений превысила расчетный предел текучести в два раза. Для всех трех рассмотренных компенсаторов увеличение овальности отводов, расположенных на основной оси трубопровода, приводит к снижению интенсивности напряжений, а для отводов на верхней полке компенсатора – к увеличению напряжений. Максимальные напряжения возникают преимущественно на внутренней поверхности стенки отвода ближе к нейтральной осигиба.

Оценочный расчет в упруго – пластической постановке циклического нагружения трубопровода приводит к снижению размаха интенсивности напряжений в отводах, максимальные пластические деформации в стенке отвода возникают также вблизи нейтральной осигиба.

В целом результаты расчета согласуются с результатами исследований влияния овальности на прочность отводов [3]. В ходе испытаний при циклическом нагружении П – образных компенсаторов продольные трещины усталости располагались в области нейтральной оси изгиба отвода, трещины возникали на внутренней поверхности отвода.

Овальность является основным фактором, ослабляющим трубу. При приложении внутреннего давления сечение трубы стремится принять круглую форму, радиус кривизны в области нейтральной оси

изгиба отвода увеличивается, что вызывает в металле дополнительные растягивающие напряжения.

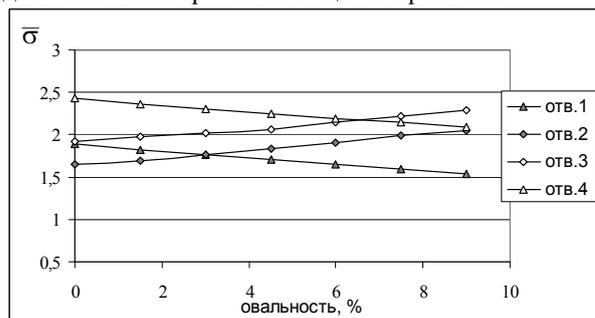


Рис. 2 – Компенсатор №1

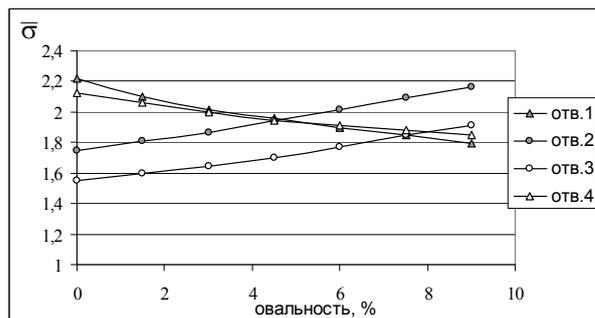


Рис. 3 – Компенсатор №2

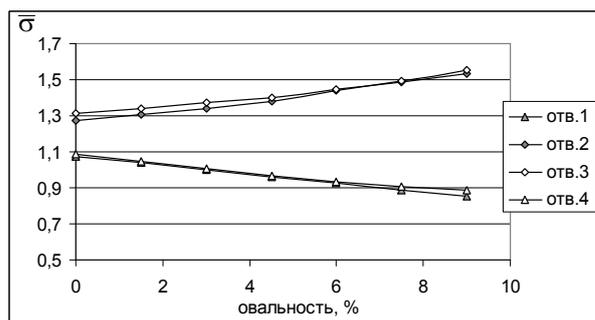


Рис. 4 – Компенсатор №3

При наличии коррозионно-активной среды в трубопроводе и значительной овальности, повышение внутренних напряжений металла стенки трубы будет способствовать появлению коррозионных трещин.

Литература

1. М.Х. Сабитов, С.И. Поникаров, *Вестник Казанского технологического университета*, **15**, 9, 182-184 (2012);
2. О.А. Перельгин, В.М. Долинский, А.В. Черенков, *Вестник Казанского технологического университета*, **2**, 74-77 (1998);
3. А.Б. Айнбиндер, А.Г. Камерштейн, *Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость. Справочное пособие*. Недра, Москва, 1982. 341 с.

© М. Х. Сабитов – канд. техн. наук, асс. каф. машин и аппаратов химических производств КНИТУ, sm9h@mail.ru;
С. И. Поникаров – д-р техн. наук, проф., зав. каф. машин и аппаратов химических производств КНИТУ, mahp_kstu@mail.ru.

© M. H. Sabitov – cand. of techn. scien., ass. of the cath. Machines and apparatus of chemical industries KNRTU, sm9h@mail.ru;
S. I. Ponikarov – doctor of techn. scien, prof., head. the cath. Machines and apparatus of chemical industries KNRTU, mahp_kstu@mail.ru.