

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], нестыковок 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 $T=2800^{\circ}\text{C}$ и $p=3,0$ МПа и $T=2200^{\circ}\text{C}$. Конструкция первого трубопровода включает два П - образных компенсатора с отводами труб размером 219х8 мм, второй - один компенсатор с отводами труб размером 108х6 мм, материал отводов - сталь 20. Результаты расчета для трех компенсаторов приведены на рисунках 2-4. Результирующие напряжения представлены в относительной форме: $\sigma/\sigma_{\text{т}}$, где $\sigma_{\text{т}}$ - предел текучести стали, σ - 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. Овальзация 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.