

средства для анализа двумерных и трехмерных полей потока жидкости или газа и позволяет моделировать в том числе комплексные трехмерные течения в колене трубы.

Для моделирования быстропротекающих процессов типа удара, разрушения и т. п. во многих отраслях техники, в частности, в авиа- и автомобилестроении успешно применяется реализующая МКЭ система LS-DYNE. Соединение в одной программной оболочке модуля ANSYS/LS-DYNA традиционных методов решения с обращением матриц и математического аппарата программы LS-DYNA, которая использует явный метод интегрирования, позволяет переходить с неявного на явный метод решения, и наоборот.

В настоящее время существует возможность эффективного применения САЕ-комплекса LS-DYNE для решения задач нелинейного инженерного анализа работы компонентов трубопровода в экстремальных условиях. Моделирование с помощью системы ANSYS/LS-DYNA целесообразно осуществлять на суперкомпьютерной технике.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алешин, В. В. Анализ прочности промышленных трубопроводов в ANSYS и ABAQUS / В. В. Алешин, В. Кобяков, В. Е. Селезнёв // САПР и графика. – 2004. – № 7. – С. 34–39.

**УДК 621.6.01**

### **ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К РАСЧЕТУ ЛОКАЛЬНОЙ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО ИЗОГНУТОГО ТРУБОПРОВОДА ПРИ НЕКОНСЕРВАТИВНОМ НЕОДНОРОДНОМ НАГРУЖЕНИИ**

**Е. И. Гарновский, М. И. Валиев**

*ОАО «АК«Транснефть», г. Москва, Российская Федерация  
ООО «Научно-исследовательский институт транспорта нефти  
и нефтепродуктов», г. Москва, Российская Федерация*

В работе проводится апробация подхода к расчету локальной потери устойчивости протяженного пространственно изогнутого трубопровода при комбинированном неоднородном нагружении. Обсуждаются результаты численного расчета нелинейного изгиба трубопровода и влияние докритического моментного состояния на устойчивость при неконсервативном нагружении. В качестве основного инструмента расчетных исследований по моделированию напряженно-деформированного состояния трубопровода использовался программный комплекс ANSYS, дополненный модулем расчета критических нагрузок локальной потери устойчивости.

Эффективность применения современных средств компьютерного моделирования на стадиях разработки, проектирования и эксплуатации промышленных трубопроводных систем высокого давления, транспортирующих углеводородные жидкости и газы, уже ни у кого не вызывают сомнения. Различные системы автоматизированного проектирования CAD/CAE, технологии на базе волоконно-оптических измерительных систем для мониторинга целостности трубопровода, АСУ по обнаружению малых утечек сейчас широко используются в проектных и эксплуатационных организациях в ОАО «АК «Транснефть».

Однако во многих случаях анализ фактического состояния в процессе строительства и эксплуатации промышленных трубопроводов по результатам технической диагностики проводится не только без применения средств компьютерного моделирования, но и вообще без каких-либо надлежащих расчетных оценок фактического состояния трубопровода в системе «грунтовое основание – опора – конструкция трубопровода – связанные (транспортируемые) сплошные среды».

В рамках работы разработана вычислительная технология комплексного анализа напряженно-деформируемого состояния и оценки критических нагрузок местной (локальной) потери устойчивости пространственно-изогнутого трубопровода при неконсервативном нагружении.

Программа расчетных исследований включает разработку и верификацию с помощью ANSYS следующих расчетных моделей трубопроводных систем:

- динамическую модель пространственно-изогнутого трубопровода при комбинированном действии неконсервативных внешних сил;
- статическую модель системы «упругое основание – подвижная (неподвижная) опора – трубопровод», учитывающую распределения главных моментов от перемещения трубопровода при действии неравномерно распределенного внутреннего давления;
- взаимодействие нестационарных потоков вязких сред и деформируемого пространственно-изогнутого трубопровода;
- расчет критических нагрузок местной (локальной) потери устойчивости протяженного пространственно изогнутого трубопровода находящегося под действием неоднородного нагружения.

Основным методом исследования неконсервативных задач теории упругой устойчивости является динамический метод, основанный на рассмотрении колебаний системы вблизи положения равновесия. Исследуемая форма равновесия будет устойчивой, если все возмущения будут ограничены во времени. Неустойчивое состояние системы – неограниченное возрастание решения, а стало быть, и параметров, характеризующих динамический процесс.

Уравнение динамической устойчивости, учитывающее моментность докритического состояния, будучи записано в матричной форме

$$C \frac{d^2 f}{dt^2} + [E - q_0 A - q_t \Phi(t) B] f = D,$$

представляет собой известное уравнение Матье-Хилла. Одно из наиболее интересных свойств этого уравнения заключается в том, что при некоторых соотношениях между его коэффициентами оно имеет неограниченные возрастающие решения. Анализ решения данного уравнения позволяет определить критические нагрузки местной (локальной) потери устойчивости протяженного пространственно-изогнутого трубопровода.

Модельные расчеты на динамическую устойчивость при комбинированном нагружении трубопроводов позволили выявить предельные значения докритических напряжений и области локальной потери устойчивости.

На основе результатов выполненных расчетов установлено, что для адекватного численного представления НДС трубопровода анализ системы «грунтовый массив – опора – связанные сплошные среды – конструкция трубопровода» следует проводить в рамках единой модели с учетом реальных распределительных и нелинейных свойств системы на всех стадиях эксплуатации трубопровода.