

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ ТЭС И АЭС

КОПСОВ А.Я., д-р техн. наук, КОЛОМЦЕВ Ю.В., канд. техн. наук, КРАСНОВСКИЙ С.Я., инж., МАСЛОВ Л.Б., ШАПИН В.И., кандидаты техн. наук, БЕЛОВ И.А., асп.

Рассматриваются вопросы применения средств конечно-элементного моделирования для решения прикладных задач вычислительной механики в энергетике.

Введение и общая постановка задачи. Кафедра теоретической и прикладной механики с 1970 г. систематически проводит научные исследования по динамике энергомашин и конструкций ТЭС и АЭС. В 1970-1972 гг. практически впервые была решена проблема оценки виброустойчивости комплексов «турбина-упругий фундамент» для первых четырех энергоблоков 300 МВт Костромской ГРЭС. Результаты проведенных исследований впоследствии были взяты за основу для практических рекомендаций по комплексной виброметрии и принятию мер по снижению их виброактивности. Аналогичная проблема в виде рекомендаций была решена для Кировской ГРЭС, г.Апатиты Мурманской области.

Важной технической проблемой была определена диагностика качества вальцовочных соединений энергооборудования. Для предприятия Ивгортеплоэнерго и ИМАШ РАН были разработаны метод и автоматическое устройство, позволяющие нормировать необходимое значение жесткости соединения при сборке и проводить вибродиагностику по параметрам вибрационного сигнала неплотностей стыка или трещины в соединении.

Выполнен цикл работ для Конаковской ГРЭС по исследованию виброустойчивости питательных турбонасосов (ПТН) энергоблоков 300 МВт. Определены причины потери механической устойчивости вследствие нарушения центровки выхлопных паропроводов и нестационарных процессов в комплексной системе «ПТН-трубопровод питательной воды-паропровод».

Существующие в настоящее время методы оценки надежности трубопроводов построены без учета колебательных процессов. Однако вибрационные нагрузки могут оказаться весьма существенным фактором истощения живучести трубопроводов, эксплуатируемых с невыявленными трещинами.

Особенно опасными могут быть непроектные ситуации, когда возникают резонансные или близкие к резонансным пространственные изгибно-крутильные колебания трубопровода. Основным источником вибрации являются спектр колебания теплоносителей при движении по трассам упругих трубопроводов с природоимпульсной причиной вибровоздействия параметрического или автоколебательного характера.

В качестве сопутствующего фактора выступают элементы опорно-подвесной системы, способствующие при определенных условиях, потере виброустойчивости конструкции в целом.

В материалах специализированного научного семинара по теме «Трубопроводы. Расчет НДС и оценки прочности» под эгидой ГУП Инженерного центра прочности, надежности и ресурса МАЭ (ГУП ЦЦП МАЭ) отмечается актуальность расчетов на прочность трубопроводных систем при динамических воздействиях, указывается на отсутствие технической политики в области развития программного обеспечения и норм прочности трубопроводных систем, а

также подтверждается необходимость разработки раздела по определению акселерограмм и спектров отклика для расчета оборудования и трубопроводов при действии динамических нагрузок.

При этом отмечается необходимость развития следующих направлений:

- вибропрочность и динамика при гидроударах;
- сейсмостойкость с учетом трения в опорах многоопорного нагружения;
- аварийные ситуации и анализ безопасности трубопроводных систем;
- программные средства для расчета конструкций из современных конструктивных материалов, включая композиты, учет армирования, слоистой структуры и анизотропии упругих свойств.

Вместе с тем очевидна необходимость разработки банка верификационных примеров, охватывающих вопросы расчета на прочность трубопроводных систем при различных видах нагрузок, и интегрированного пакета САПР, а также разработки программных модулей оценки прочности с дифференциацией по различным нормативным документам (атомная энергетика, теплоэнергетика, химия, нефтегазовая индустрия, теплосети и др.).

Так, вибрационные обследования [1] паропроводной системы девяти энергоблоков Костромской ГРЭС на стационарных режимах и при пусках позволили выявить следующее: практически весь трубопроводный тракт (питательный трубопровод, паропроводы в пределах котла, паропроводы свежего пара и горячего промперегрева) вибрирует с частотой 2-5 Гц. Наличие существенной составляющей вибрационной нагрузки в указанном диапазоне частот выявлено и при виброобследовании паропроводов АЭС с ВВЭР –1000. Оценка остаточного ресурса с учетом влияния вибрации не проводилась. Все перечисленные факты определяют актуальность вибрационного контроля паропроводов и необходимость создания соответствующей нормативной технологии и базы.

Существует и другая сторона проблемы. Метрологический аспект таких виброобследований определен тем, что применяемая виброаппаратура в области частот ниже 5 Гц дает недостоверные результаты. Проблема заключается в отсутствии надежных средств измерения вибрации в области инфранизких частот, которая прогнозируется как зона наиболее опасных возможных резонансных состояний трубопроводов.

Методика оценки технического состояния и остаточного ресурса трубопроводов энергоблоков АЭС [2] не содержит в достаточной степени способов оценки вибропрочностных характеристик. В

[3] предложен способ расчета только пиковых значений виброскоростей.

В [4,5,6,7] при оценке живучести и разработке способов ее повышения для паропроводов не рассмотрены вопросы, связанные с явлениями возможной потери динамической устойчивости вследствие изменений геометрических, жесткостных и диссипативных конструктивных параметров как в стационарном горячем состоянии паропровода, так и в переходных технологических процессах. Отсутствуют соответствующие рекомендации и в методических указаниях по контролю металла и продлению срока службы трубопроводов II, III, IV категорий в соответствии с нормативным документом [8].

В то же время намечается тенденция перехода от традиционной дефектоскопии к технической диагностике с применением комплексных подходов, сочетающих аналитическое моделирование с автоматизированным мониторингом вибросостояния конструкций.

Таким образом, в настоящей работе ставится общая задача разработки алгоритма расчета собственных частот и форм колебаний сложной конструкции трубопроводов и аппаратурной реализации автоматизированного вибромониторинга с верификацией

результатов и оценкой влияния вибрации на ресурс с выходом на нормативную базу. Исследования проводились на физически подобных моделях и натуральных объектах.

На первом этапе при выборе базового объекта исследования проводились для трубопровода основного конденсата Кольской АЭС с ВВЭР-440 как наиболее доступного для проведения экспериментальных измерений.

Ниже приведены результаты первого этапа исследований по численному моделированию собственных колебаний трубопроводов.

Расчет резонансных частот и форм колебаний трубопровода. Разработана пространственная стержневая конечно-элементная модель трубопровода основного конденсата (рис.1). В качестве конечного элемента используется стандартный 2-узловой элемент, имеющий шесть степеней свободы в узле (три компоненты вектора перемещений и три угла поворота) и работающий на растяжение-сжатие, изгиб в двух плоскостях и кручение (рис.2).

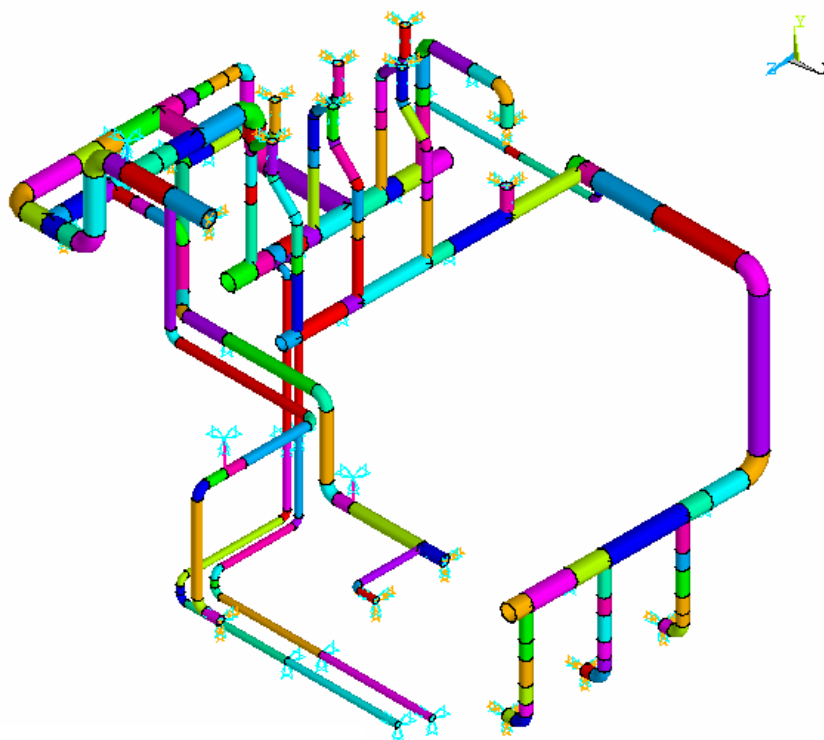


Рис.1. Конечно-элементная модель трубопровода основного конденсата

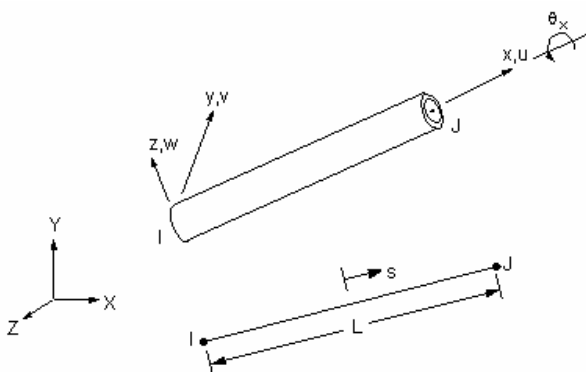


Рис.2. Схема используемого в решении стержневого конечного элемента

Интерполяционные соотношения, задающие изменение компонент перемещений точек стержня u, v, w вдоль оси стержня, имеют вид [9]:

$$u = \frac{1}{2}(u_I(1-s) + u_J(1+s)),$$

$$v = \frac{1}{2}\left(v_I\left(1 - \frac{s}{2}(3-s^2)\right) + v_J\left(1 + \frac{s}{2}(3-s^2)\right)\right) + \frac{L}{8}\left(\theta_{z,I}(1-s^2)(1-s) - \theta_{z,J}(1-s^2)(1+s)\right)$$

$$w = \frac{1}{2}\left(w_I\left(1 - \frac{s}{2}(3-s^2)\right) + w_J\left(1 + \frac{s}{2}(3-s^2)\right)\right) - \frac{L}{8}\left(\theta_{y,I}(1-s^2)(1-s) - \theta_{y,J}(1-s^2)(1+s)\right)$$

$$\theta_x = \frac{1}{2}(\theta_{x,I}(1-s) + \theta_{x,J}(1+s))$$

где L – длина элемента; s – локальная координата вдоль оси стержня; u_I, v_I, w_I и u_J, v_J, w_J – линейные перемещения узлов конечного элемента в локальной системе координат (x, y, z) , жестко связанной с элементом; $\theta_{x,I}, \theta_{y,I}, \theta_{z,I}$ и $\theta_{x,J}, \theta_{y,J}, \theta_{z,J}$ – угловые перемещения узлов конечного элемента в локальной системе координат.

Линейные размеры трубопровода и характеристики сечений соответствуют проектным значениям. Параметры материала труб (сталь марки 20, МРТУ 14-4-21-67) принимались следующими:

- модуль упругости – $2,0 \cdot 10^{11}$ Па;
- коэффициент Пуассона – 0,3;
- плотность – 7800 кг/м^3 .

Конечно-элементная модель трубопровода геометрически разделялась на две основные секции: от конденсатных электронасосов (КЭН) до эжекторов – первая, от эжекторов до ПНД-1 (подогреватель низкого давления) – вторая секция.

Модель учитывала:

- наличие криволинейных элементов, задвижек и переходов между трубами различных диаметров согласно стандарту МВН и характеристикам соответствующих конструктивных элементов;
- наличие воды в трубе с плотностью 1000 кг/м^3 ;
- использование следующих видов опор:
- пружинные опоры с двумя тягами и известными жесткостями;

- жесткие опоры, фиксирующие все степени свободы в соответствующем узле и моделирующие границы регистрации трубопровода;
- жесткие опоры, фиксирующие четыре степени свободы в соответствующем узле (поперечные перемещения и углы поворота в плоскостях, проходящих через продольную ось трубы) и моделирующие скользящие опоры;
- жесткие подвески, запрещающие перемещения в вертикальном направлении и вращение труб вокруг собственных осей.

Разработка модели и расчет собственных колебаний трубопровода был выполнен в системе конечно-элементного анализа ANSYS, ANSYS Inc. [10].

Результаты расчета собственных частот и форм колебаний. В результате расчета определены значения собственных частот колебаний трубопровода и соответствующие формы колебаний. В таблице представлены десять низших значений и форм для первой секции трубопровода и двадцать – для второй.

Таблица. Собственные частоты и формы колебаний трубопровода основного конденсата

Номер формы	Частота, Гц	Примечание
Первая секция		
1, 2	5,4129 8,6677	Колебания трубы Ду 400
3, 5	9,8320 10,236	Колебания трубы Ду 150 в вертикальной и горизонтальной плоскостях
4, 6, 7, 8	10,177 10,586 10,726 13,707	Совместные колебания всех труб
9	23,717	Колебания трубы Ду 300 и труб, ведущих к эжекторам
10	27,253	Наиболее выраженные колебания трубы Ду 400
Вторая секция		
1, 3, 6, 10, 15	5,2948 6,7329 7,8958 11,174 14,063	Колебания трубы Ду 200, ведущей к ОД ПНД-1
2, 4, 8, 9, 13, 14	6,5258 6,7944 9,5648 9,7166 13,227 13,890	Колебания труб Ду 150, ведущих на ПСУ-1,2
5, 11	7,7531 11,670	Колебания трубы Ду 400 и прилегающих к ней труб
7, 12, 16, 17	8,7787 12,366 14,280 15,574	Колебания трубы Ду 250, ведущей в конденсатор
18, 19	16,340 17,008	Колебания трубы Ду 400 и трубы Ду 250, ведущей в конденсатор
20	20,328	Колебания трубы Ду 250, идущей от ЭУ

На рис. 3-6 приведены некоторые схемы возможных форм колебаний.

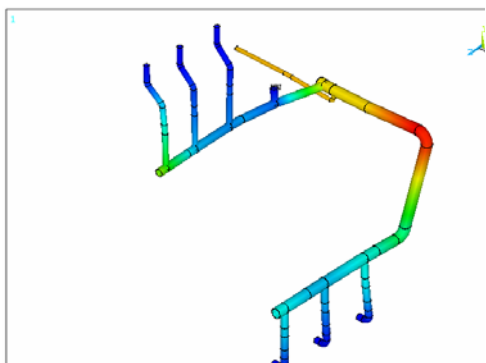


Рис.3. Форма 8, частота 13.707 Гц

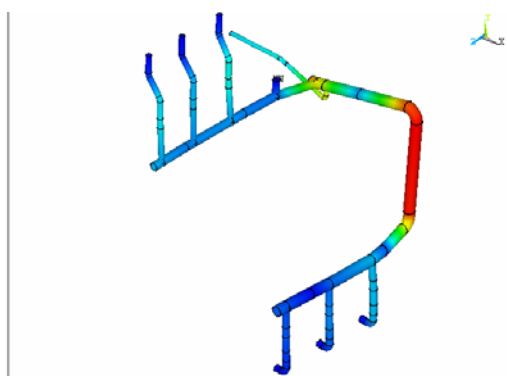


Рис.4. Форма 10, частота 27.253 Гц

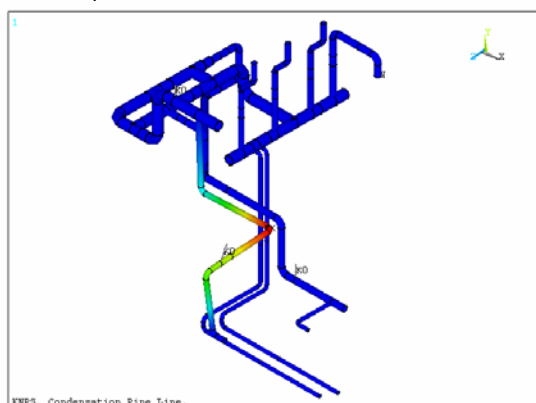


Рис.5. Форма 1, частота 5.2948 Гц

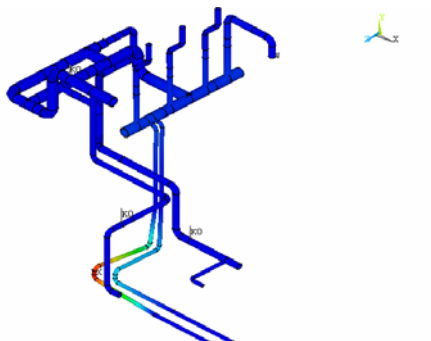


Рис.6. Форма 2, частота 6.5258 Гц

Анализ результатов расчета. Анализ частот и форм колебаний определяет следующие характерные особенности вибрационного резонансного состояния объекта:

- существуют два частотных диапазона (от 5,2 до 9,8 Гц и от 11,1 до 17,0 Гц), в которые входит большинство резонансных частот второй секции трубопровода;
- большинство резонансных частот первой части трубопровода находится в диапазоне от 9,8 до 10,8 Гц;
- трубы большого диаметра второй секции закреплены достаточно жестко, а в частотном диапазоне до 10 Гц определяются в основном резонансные состояния труб малого диаметра (Dy 150, 200), на которые и приходится большая часть низкочастотного спектра.

Заключение

Анализ собственных частот и форм колебаний трубопровода основного конденсата показал наличие достаточно плотного спектра в двух низкочастотных подобластях. С точки зрения диагностики наиболее опасных участков трубопровода представляет интерес лишь ограниченное число частот и форм колебаний трубы Ду400, ведущей к насосам, и трубы Ду300, ведущей к эжекторам. Отдельного рассмотрения в процессе вибромониторинга требуют вибрации трубы Ду250, находящейся под разряжением конденсатора.

Геометрический анализ собственных форм колебаний позволяет спрогнозировать характерные участки трубопроводов с максимальными виброперемещениями в резонансном состоянии для проведения рендомизированного натурального вибромониторинга.

Апробированное аппаратное решение проблемы автоматизированного синхронного вибромониторинга с решениями задачи идентификации по компонентам напряженно-деформированного состояния и оценки остаточного ресурса являются естественным продолжением работы.

Список литературы

1. **Живучесть** паропроводов стареющих тепловых электростанций / Ю.Л. Израилев, А.Я. Копсов, Ф.А. Хромченко и др. – М.: Изд. Торус пресс, 2002. – 616 с.
2. **РД ЭО-0185-00.** Методика оценки технического состояния и остаточного ресурса трубопроводов энергоблоков АЭС. – М., 1999. – 62 с.
3. **Нормы** расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды: Утв. ГТН РФ №50 от 25.08.1998 г. Введены в действие с 01.09.1999 г.
4. **Штромберг Ю.Ю.** Совершенствование отраслевой системы нормативов по оценке повреждений и живучести паропроводов и труб поверхностей нагрева паровых котлов ТЭС: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 1999. – 27 с.

5. Дитяшев Б.Д. Повышение живучести паропроводов ТЭС на основе совершенствования опорно-подвесной системы: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 2000. – 20 с.

6. Балдин Н.Н. Повышение живучести паропроводных гибов, эксплуатируемых в условиях ползучести на стареющих ТЭС: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 2001. – 22 с.

7. Копсов А.Я. Увеличение живучести литых корпусных турбин и паропроводов стареющих ТЭС:

Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Иваново, 2001. – 35 с.

8. РД 153-34.0-17.464-00. Методические указания по контролю металла и продлению срока службы трубопроводов II, III и IV категорий: Утв. РАО «ЕЭС России» от 29.12.2000.

9. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике / Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 541 с.

10. ANSYS Basic Analysis Procedures Guide. 1998.