



Расчеты на сейсмические воздействия трубопроводов АЭС с использованием российской САЕ-системы APM WinMachine

Владимир Шелофаст, Ризван Шахбанов, Алексей Сухоручко

Атомные электростанции — это сложная техническая система, состоящая из большого числа различных агрегатов и оборудования, связанных между собой трубопроводами. Суммарная длина трубопроводов на АЭС может достигать десятков километров, а их общая стоимость доходит до 10% стоимости всего оборудования станции. Незначительное повреждение участка трубопровода может привести к серьезным последствиям. Поэтому обеспечение прочности трубопроводов АЭС является одной из главных задач не только при проектировании и монтаже, но и в процессе эксплуатации. Конструкции трубопроводов должны обеспечить работоспособность, надежность и безопасность в течение всего срока службы, указанного в технических условиях или паспортах оборудования. Эти требования определяют прямую связь между нормативными документами и прочностью элементов, работоспособностью, надежностью и безопасностью.

Оценка прочности трубопроводов атомных электростанций, спроектированных, изготовленных и эксплуатируемых в полном соответствии с Правилами АЭУ, в Российской Федерации проводится в соответствии с «Нормами расчета на прочность оборудования и трубопроводов атом-

ных энергетических установок» (ПНАЭ Г-7-002-86)» [1].

Обоснование прочности на продление срока службы оборудования проводится исходя из одного из двух положений:

- фактических условий эксплуатации, фактической геометрии элементов и фактических механических свойств материалов, использованных при изготовлении;
- расчета прочности в рамках технического проекта изделия на полный срок эксплуатации с учетом его продления.

Второе положение можно использовать, если в процессе прошедшей эксплуатации не зафиксировано отклонений от условий эксплуатации, дефектов или уменьшения размеров сверх предусмотренных проектом.

Согласно [1], расчет на прочность необходимо проводить в два этапа:

1. Расчет по выбору основных размеров.
2. Поверочный расчет.

В результате выполнения первого этапа расчета определяют основные геометрические размеры элементов оборудования АЭС. При выполнении расчета по выбору основных размеров расчетными нагрузками являются расчетное давление и давление гидроиспытаний.

После расчета по выбору основных размеров проводят по-

верочный расчет с учетом всех расчетных нагрузок и всех расчетных режимов эксплуатации. Основными расчетными нагрузками являются: внутреннее или наружное давление, масса изделия и его содержимого, дополнительные нагрузки (масса присоединенных изделий, изоляции трубопроводов и т.п.), усилия от реакции опор, температурные воздействия, вибрационные нагрузки, сейсмические нагрузки.

- Поверочный расчет включает:
- расчет на статическую прочность;
 - расчет на устойчивость;
 - расчет на циклическую прочность;
 - расчет на сопротивление хрупкому разрушению;
 - расчет на сейсмические воздействия;
 - расчет на вибропрочность;
 - расчет на прогрессирующее формоизменение.

В результате расчетов определяются величины действующих в конструкции напряжений и дефор-

Владимир Шелофаст
Д.т.н., профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана.
Ризван Шахбанов
Директор ООО «Центр компьютерных технологий «Сигма».
Алексей Сухоручко
Инженер, компания НТЦ «АПМ».

маций, которые сравниваются с допускаемыми значениями (расчетные группы категорий напряжений), указанными в [1].

В действующих нормах [1] указаны рекомендуемые методы для расчета типовых элементов и узлов трубопроводов АЭС на основе методов сопротивления материалов, теории упругости и строительной механики. Поскольку методика заключается в использовании аналитического «ручного» расчета, то ее применение не обходится без существенных упрощений конструкции, которые приводят к разбиению

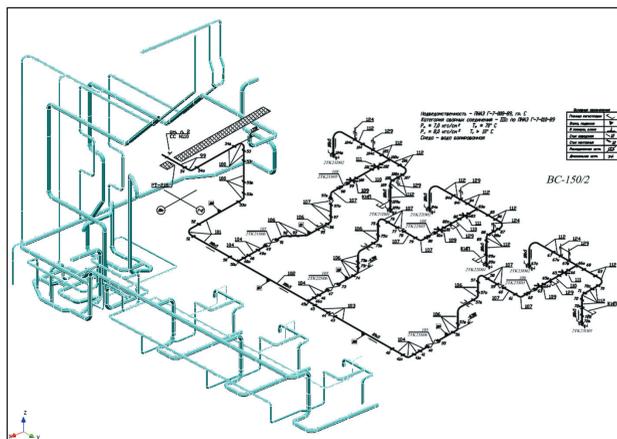


Рис. 1. Часть исполнительной схемы и модель общей сети трубопровода

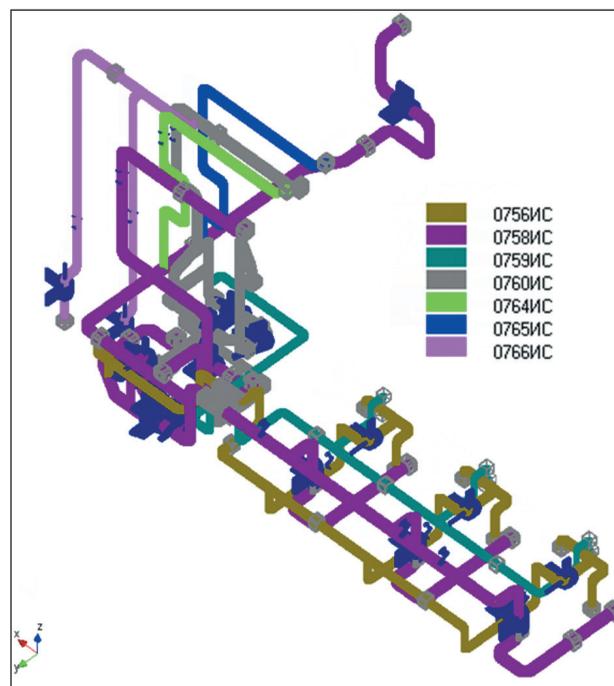


Рис. 2. Конечно-элементная модель трубопровода в модуле APM Structure3D

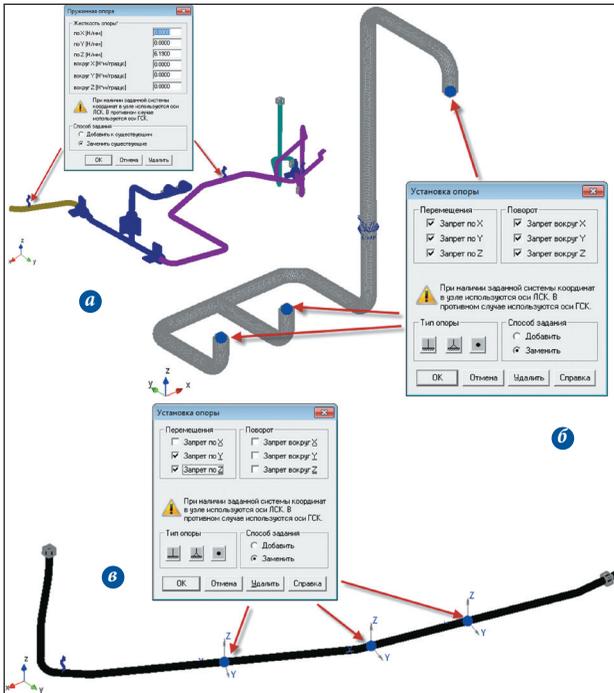


Рис. 3. Типы опор: а — упругое закрепление (для моделирования пружинных опор/подвесок); б — жесткая опора (исключение всех перемещений и поворотов); в — направляющие опоры

рассчитываемого объекта на более простые элементы. Далее упрощенные элементы рассчитываются отдельно, а взаимное влияние соседних элементов учитывается введением соответствующих граничных условий. Подобные упрощения вносят большую погрешность в расчет, поэтому в случае сложных конструкций данный подход недостаточно точен. Порой весьма трудной задачей является определение коэффициента концентрации напряжений в зонах резкого изменения геометрии. В связи с этим возникает потребность в ис-

пользовании численных методов моделирования и расчета сложных конструкций.

Система автоматизированного расчета и проектирования механического оборудования и конструкций в области машиностроения APM WinMachine способна решать сложные задачи, необходимые для расчета остаточного ресурса или продления срока службы трубопроводов АЭС. В системе APM WinMachine реализованы алгоритмы для проведения прочностного, теплового, а также спектрального анализа, необходимые для расчетов объектов АЭС.

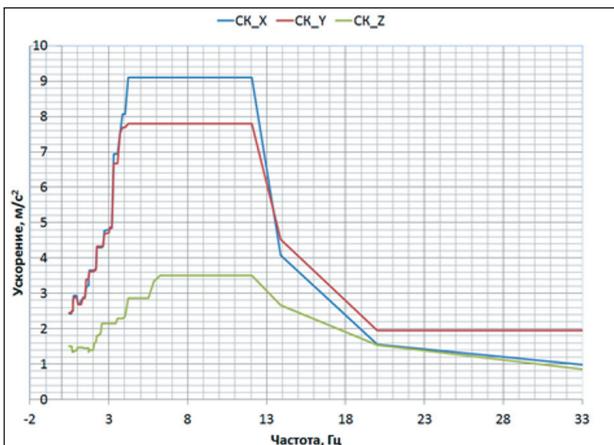


Рис. 4. Пример диаграммы спектров ответа

Актуальным на данный момент является расчет на сейсмическую прочность. Это связано с рядом крупнейших аварий, вызванных сейсмическими воздействиями, одна из которых, произошедшая 11 марта 2011 года на АЭС «Фукусима-1» в Японии, нанесла серьезный ущерб окружающей среде.

В системе APM WinMachine для расчета напряженно-деформированного состояния, устойчивости, собственных и вынужденных колебаний деталей и конструкций используется модуль APM Structure3D [4]. Данный модуль позволяет создавать расчетные модели, достаточно близко описывающие геометрию

рассчитываемых узлов, и проводить необходимый анализ с использованием метода конечных элементов.

На рис. 1 представлена часть исполнительной схемы и модель геометрии типового трубопровода для расчета на сейсмические воздействия в APM WinMachine. Расчетная модель включает все основные элементы трубопровода.

Следует отметить, что немаловажным является учет особенностей реализации метода конечных элементов. При построении модели трубопровода в APM WinMachine применяются оболочечные конечные элементы трех- и четырехузловые типа ДКТ (эле-

APM Engineering

Оптимальные решения в строительстве и машиностроении

АПМ
 Научно-технический центр
 Тел.: (498) 600-25-10
 E-mail: com@apm.ru
 www.cae.apm.ru
 www.apm.ru

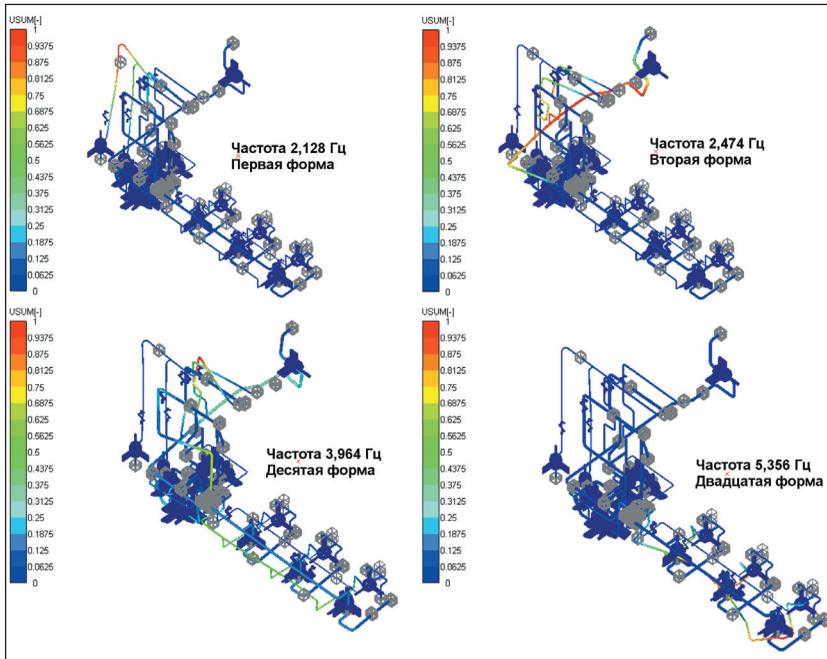


Рис. 5. Пример вывода рассчитанных собственных форм колебаний трубопровода на соответствующих им частотах собственных колебаний

мент с дискретным наложением гипотезы Кирхгофа). При использовании данных типов сеток вращательная степень свободы относительно локальной оси Z может быть активирована пользователем.

Конечно-элементная модель трубопровода с учетом разнесения участков схемы по слоям (с дополнительной цветовой раскраской) представлена на рис. 2.

Расчетная модель трубопровода должна корректно отражать граничные условия оцениваемой части системы. Следует различать технологические границы системы, подлежащие сейсмической квалификации, и физические границы трубопровода. Так, если квалифицируемая часть системы ограничивается трубопроводной арматурой, то модель трубопровода должна быть продолжена таким образом, чтобы минимизировать влияние отсекаемой части трубопровода на часть, подлежащую сейсмической квалификации. Граничные условия могут быть воспроизведены созданием на границе соот-

ветствующих усилий или перемещений, а также использованием дополнительных элементов, примыкающих к исследуемому узлу и воздействующих на него заданным образом.

К несущим строительным конструкциям трубопроводы крепятся с помощью различных опор. Типы опор, используемые при моделировании граничных условий трубопровода в системе APM WinMachine, представлены на рис. 3.

В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ, анализ сейсмостойкости трубопроводов АЭС, находящихся в эксплуатации, проводится с использованием так называемого метода граничной сейсмостойкости (МГС) [2], [3]. Суть метода состоит в определении величины граничной сейсмостойкости (параметра HCLPF). Для вычисления величины граничной сейсмостойкости HCLPF используется коэффициент сейсмического запаса FS.

Методы, применяемые в рамках МГС для определения сейсмической реакции конструкций, систем и оборудования (КСО), выбираются

в зависимости от динамических характеристик рассматриваемого объекта и особенности его опорной системы. В системе APM WinMachine в модуле APM Structure3D реализованы два основных метода для определения динамической реакции при землетрясении:

- статический анализ, или метод эквивалентной статической нагрузки, в рамках сейсмической квалификации КСО используется путем задания статического нагружения исследуемой конструкции инерционной нагрузкой, распределенной или сосредоточенной в узлах расчетной модели. В свою очередь, инерционная нагрузка определяется как произведение весовой нагрузки конструкции на набор соответствующих коэффициентов, определяемых по СНиП или аналогичным нормативным документам. В рамках настоящей методики применение метода эквивалентной статической нагрузки ограничивается оборудованием и компонентами, которые имеют первую собственную частоту колебаний выше 20 Гц;
- линейно-спектральный метод предполагает проведение модального анализа рассматриваемой конструкции. На этом этапе определяются формы и частоты собственных колебаний вплоть до характерной частоты f_{max} , соответствующей ускорению нулевого периода. Далее, система загружается инерционной нагрузкой по каждой из вычисленных форм колебаний и для каждого пространственного направления сейсмического воздействия. При этом для каждой из форм колебаний и направления сейсмического воздействия определяется полный отклик системы: распределение внутренних усилий, перемещения и реакции опор и т.д. Учет влияния высших форм колебаний, не включенных в основной модальный отклик, проводится путем статической коррекции. При этом особое внимание должно быть уделено различным сейсмическим смещениям жестких заделок и опор конструкций. Результирующий ответ конструкции вычисляется с использованием правила суммирования ККСК (корень квадратный из суммы квадратов).

При использовании линейно-спектрального метода в качестве исходного сейсмического воздействия принимаются поэтажные спектры ответа, вычисленные на основе динамического анализа основных зданий и сооружений. Для расчетов трубопроводов, как правило, используются расширенные огибающие спектры. На рис. 4 показан пример диаграммы спектров ответа для конкретной отметки расположения участка трубопровода. Согласно [1], для расчета трубопроводов и оборудования значение относительного демпфирования принимается равным 2% относительно критического.

На рис. 5 представлены различные собственные формы колебаний трубопроводов, полученные после проведения расчета в модуле

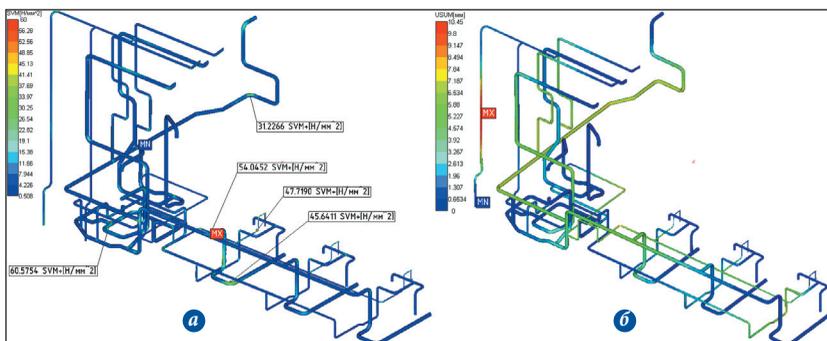


Рис. 6. Результаты расчета трубопровода при сейсмических воздействиях: а — распределение приведенных (эквивалентных) напряжений; б — распределение суммарных перемещений



APM Structure3D, а также соответствующие им частоты собственных колебаний.

В приведенном примере первая собственная частота колебаний трубопровода равна 2,128 Гц. Согласно [1], расчет на сейсмические воздействия проводился линейно-спектральным методом с учетом 35 собственных форм колебаний трубопровода. Сейсмические нагрузки определялись с использованием поэтажных спектров ответа для необходимой отметки. На рис. 6 представлены результаты расчета трубопровода при сейсмических воздействиях.

Использование системы APM WinMachine позволило в короткий срок построить точную модель трубопровода, а также провести необходимые расчеты. Данная работа показывает, что система APM WinMachine является высокоэффективным инструментом для изучения напряженно-деформированного состояния сложных пространственных конструкций и

может успешно применяться для оценки прочности трубопровода атомных электростанций при сейсмических воздействиях.

В ближайшем будущем в модуль прочностного анализа APM Structure3D будет добавлен конечный элемент нового типа — TUBE (участок трубопровода). Это позволит уменьшить размерность решаемых задач и снизить временные затраты на расчет. При этом упрощается сама процедура подготовки моделей и выполнение анализа результатов расчета. Новый элемент крайне актуален для моделирования конструкций трубопроводов, которые встречаются во многих отраслях промышленности.

Применение системы APM WinMachine для расчетов элементов АЭС позволяет выполнить все требования, предъявляемые «Нормами расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок» (ПНАЭ Г-7-002-86), облегчает труд и позволяет

выполнять анализ прочности сложных систем в условиях жестких ограничений по срокам проектирования.

Список использованных источников

1. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86). М.: Энергоатомиздат, 1989. 525 с.
2. Evaluation of Seismic Safety for Existing Nuclear Installation // Safety Standards Series № NS-G-2.13, IAEA, Vienna, 2009.
3. Seismic Evaluation of Existing Nuclear Power Plants // Safety Reports Series № 28, IAEA, Vienna, 2003.
4. Аттестационный паспорт программного средства APM Structure3D (версия 10.2). Регистрационный номер 330 от 18 апреля 2013 года. ➤