



# Расчеты на сейсмические воздействия оборудования и строительных металлоконструкций АЭС с использованием российской САЕ-системы APM WinMachine

Владимир Шелофаст, Ризван Шахбанов, Артем Абдурашитов, Алексей Сухоручко

*В данной статье проводится анализ использования российской САЕ-системы APM WinMachine для расчета на сейсмические воздействия строительных конструкций и оборудования АЭС. Большое внимание уделено методике и особенностям расчета на сейсмические воздействия в соответствии с «Нормами расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок» (ПНАЭ Г-7-002-86) и рекомендациями МАГАТЭ. В результате анализа сделан вывод о преимуществах использования APM WinMachine для решения поставленной задачи.*

Атомные электростанции — это сложная техническая система, состоящая из большого числа различных агрегатов и оборудования, трубопроводов и строительных конструкций, предназначенных для хранения, проведения контроля и ремонта оборудования.

В настоящее время в Российской Федерации на десяти действующих АЭС эксплуатируется 33 энергоблока с различными типами реакторов. При этом, в соответ-

ствии с национальной программой по развитию атомной энергетики, в ближайшие годы планируется ввод 28 новых энергоблоков, а также продление срока службы уже действующих реакторов.

При проектировании новых энергоблоков в Российской Федерации одним из основных документов, регламентирующих безопасность АЭС, является НП-03-01 «Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций» [1].

Данный документ предъявляет требования к обеспечению безопасности наземных атомных станций с реакторами всех типов при сейсмических воздействиях, определению категории сейсмостойкости элементов атомных станций, обеспечению сейсмостойкости строительных конструкций.

Согласно НП-03-01 при проектировании АЭС необходимо обосновать сейсмостойкость оборудования и строительных конструкций. Есть два способа обоснования сейсмостойкости оборудования и строительных конструкций:

- экспериментальное обоснование;
- расчетное обоснование.

При первом способе обоснования сейсмостойкость оборудования и строительной конструкции на 100% подтверждается экспериментом. Данный вариант более предпочтителен, но имеет определенные проблемы и минусы:

- не всегда возможно проведение эксперимента. К примеру, невозможно создать сейсмику, которая будет соответствовать требованиям, предъявляемым к конструкции;

<b>Владимир Шелофаст</b>
Д.т.н., профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, генеральный директор НТЦ «АПМ».
<b>Ризван Шахбанов</b>
Директор «Центра компьютерных технологий «Сигма».
<b>Артем Абдурашитов</b>
Инженер-прочнист НТЦ «АПМ».
<b>Алексей Сухоручко</b>
Инженер НТЦ «АПМ».

- **большая стоимость эксперимента.** К примеру, если изготовить стенд для конкретного оборудования, то при проведении эксперимента необходимо, чтобы оборудование было закреплено на стенде и подвергалось рабочим нагрузкам. Далее, если приложении дополнительных воздействий, таких как сейсмика, падение самолета или воздушно-ударной волна, стенд разрушился, оборудование стоимостью в десятки миллионов рублей тоже стало непригодным к использованию. Поэтому все чаще используется расчетное обоснование сейсмостойкости оборудования

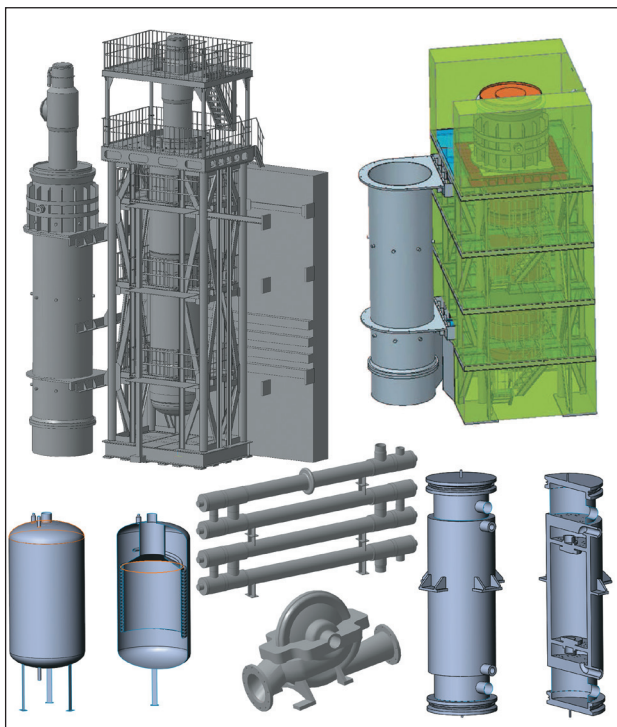


Рис. 1. Примеры строительных конструкций и оборудования АЭС

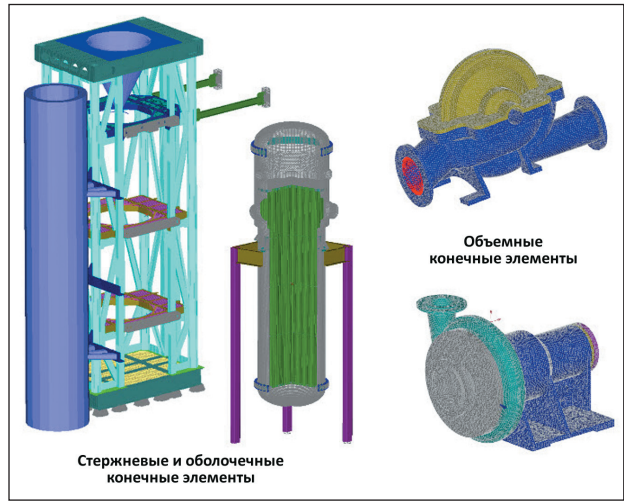


Рис. 2. Модели, построенные в APM Structure3D из различных типов конечных элементов



и строительных конструкций. Оценка прочности оборудования и строительных конструкций атомных электростанций проводится в соответствии с «Нормами расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических «установок» (ПНАЭ Г-7-002-86)» [2].

На рис. 1 представлены различные конструкции и оборудование, используемые на современных АЭС и подлежащие проверке сейсмостойкости.

Для проведения расчетного обоснования сейсмостойкости АЭС используются различные CAE-системы, но обязательно прошедшие проверку Экспертным советом по аттестации программных средств при Ростехнадзоре.

Одной из основных отечественных CAE-систем, разреженных для расчета элементов АЭС, является «Система автоматизированного расчета и проектирования механического оборудования и конструкций в области машиностроения APM WinMachine». Ее расчетное ядро — модуль APM Structure3D — имеет аттестационный паспорт программного средства № 330 от 18.04.2013 [5]. В данном модуле разработаны решения для сложных задач напряженно-деформированного состояния, устойчивости, теплового и спектрального анализ, вынужденных колебаний.

APM Structure3D позволяет создавать расчетные модели, достаточно близко описывающие геометрию оборудования или строительной конструкции, и может быть использован как при проекционном или поверочном расчете, так и при расчете остаточного ресурса. В данном модуле используются различные типы конечных элементов — стержневые, оболочечные, объемные, а также специальные. Для работы с большими размерными задачами возможно применение метода подконструкций. Примеры применения различных типов конечных элементов при моделировании конструкций и элементов АЭС представлены на рис. 2.

При построении расчетной модели в APM Structure3D следует отдавать предпочтение стержневым и оболочечным конечным элементам, поскольку это ускоряет как процесс создания модели, так и

возможность ее модернизации в случае необходимости. К примеру, если конструкция изготавливается из листового проката, проще выполнить ее в виде пластин. Тогда для поиска минимальной толщины, удовлетворяющей нормативам по расчету, достаточно будет менять только толщину данных элементов при задании их свойств. При использовании в конструкции различного сортамента металлопроката подойдут стержневые элементы, для которых в APM WinMachine создано множество библиотек стандартных поперечных сечений и есть возможность создания своей библиотеки для хранения нестандартных профилей. Но порой, в связи с геометрическими особенностями конструкции, требуется применение объемных конечных элементов.

В APM Structure3D предусмотрено использование функции «Слой». Данная функция имеет то же назначение, что и в 2D- и 3D-графических редакторах, с тем отличием, что в слое помещаются конечные элементы и их узлы. Она позволяет разбить всю конструкцию или детали конструкции на отдельные составляющие, с которыми в дальнейшем можно производить различные операции, в том числе и на этапе просмотра результатов расчета.

Основным этапом построения расчетной модели является задание граничных условий. Все граничные условия можно разделить на две основные группы:

- кинематические граничные условия (опоры);
- физические граничные условия (нагрузки).

Для задания кинематических граничных условий используются различные виды опор (рис. 3). Кроме стандартных «двусторонних» опор, обеспечивающих запреты перемещений и углов поворотов, созданы специальные опоры и связи:

- односторонняя опора (данный вид опор создает ограничение перемещения или угла поворота в положительном или отрицательном направлении относительно глобальной или локальной системы координат узла);
- упругая опора (позволяет задавать жесткость в различных направлениях как перемещения узла, так и его вращения);

- упругая связь (имеет тот же смысл, что и упругая опора, с той разницей, что связь позволяет задавать жесткость между узлами без опор);
- совместные перемещения (данная связь устанавливается между группой узлов с целью их совместного перемещения или вращения вдоль любой из осей);
- смещение опоры (в APM Structure3D есть возможность задания перемещения в узле).

Для создания физических граничных условий — нагрузок в APM Structure3D — создаются отдельные загрузки, которые в дальнейшем могут быть использованы для создания различных

комбинаций загружений. Значение влияния каждого загружения задается на основе СНиП или других стандартов в виде множителя. Спектр нагрузок, доступных для моделирования внешних воздействий, достаточно широк — начиная от узловых и распределенных усилий по конечным элементам и заканчивая нагрузками естественного характера, такими как гравитационные, сейсмические, снег, ветер, пульсации ветра.

Для определения напряженно-деформированного состояния конструкции необходимо предварительно провести модальный анализ с целью определения значения первой собственной частоты

Реклама

## Оптимальные решения в строительстве и машиностроении

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

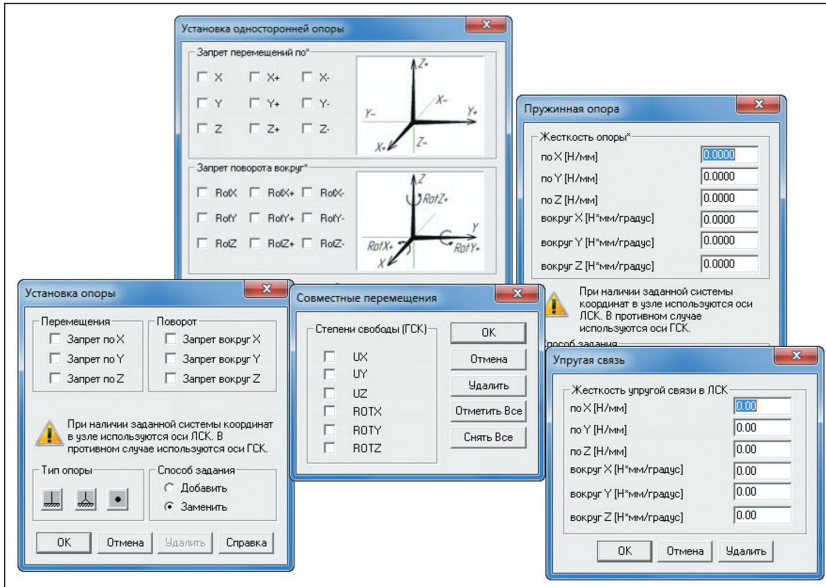


Рис. 3. Диалоговые окна задания опор и связей в APM Structure3D

колебаний (рис. 4) и выбора метода определения динамической реакции при землетрясении.

В модуле APM Structure3D реализованы два метода определения динамической реакции при землетрясении.

**Метод эквивалентной статической нагрузки** (рис. 5). Согласно ПНАЭ Г-7-002-86 данный метод может быть использован при условии, что первая собственная частота колебания конструкции или оборудования превышает 20 Гц. Для реализации этого метода в модуле APM Structure3D создаются отдельные загрузки,

в которых прикладываются ускорения (полученные по спектрам ответа) по трем координатным осям. Если первая собственная частота колебания лежит в пределах 20-33 Гц, данные загрузки входят в комбинации загрузок с множителем 1,3. Если же первая собственная частота колебания более 33 Гц, то множитель составляет 1,0.

**Линейно-спектральный метод** (рис. 6). Данный метод предполагает проведение модального анализа конструкции. В качестве исходного сейсмического воздействия принима-

ются поэтажные спектры ответа. Для задания спектра ответа в APM Structure3D создается отдельное динамическое нагружение. При задании данного нагружения необходимо указать количество собственных форм, учитываемых в расчете. Спектр ответа при этом вводится в виде графика, по одной оси которого задается период колебания, а по другой может быть ускорение, скорость или перемещение. Следует обратить внимание, что обычно исходный спектр ответа задается зависимостью от частоты колебания. Поэтому требуется перевести частоту колебания в период, используя следующую формулу:

$$T=1/f,$$

где  $f$  — частота колебания системы.

Для оборудования, находящегося под давлением, форма отказа, связанная с общей прочностью корпуса, при сейсмическом воздействии не является определяющей. Более вероятные формы отказа при сейсмике следует ожидать в местах с концентрацией напряжений (подводящие патрубки оборудования, места приварки опорных конструкций и т.п.). Поэтому при расчете оборудования необходимо учитывать нагрузки на патрубки от трубопроводов. Для этого создается еще одно отдельное нагружение, являющееся неотъемлемой частью расчетных комбинаций загрузок.

Сейсмические расчеты строительных конструкций объектов АЭС выполняются с учетом трех пространственных компонентов сейсмического воздействия, приложенных к основанию объекта по двум горизонтальным (оси X, Y) и одному вертикальному (ось Z) направлениям. В расчетную модель строительной конструкции может включаться различное оборудование. Если оборудование не имеет дополнительной инерционной составляющей нагрузки, вызванной объемом находящейся в нем жидкости, то

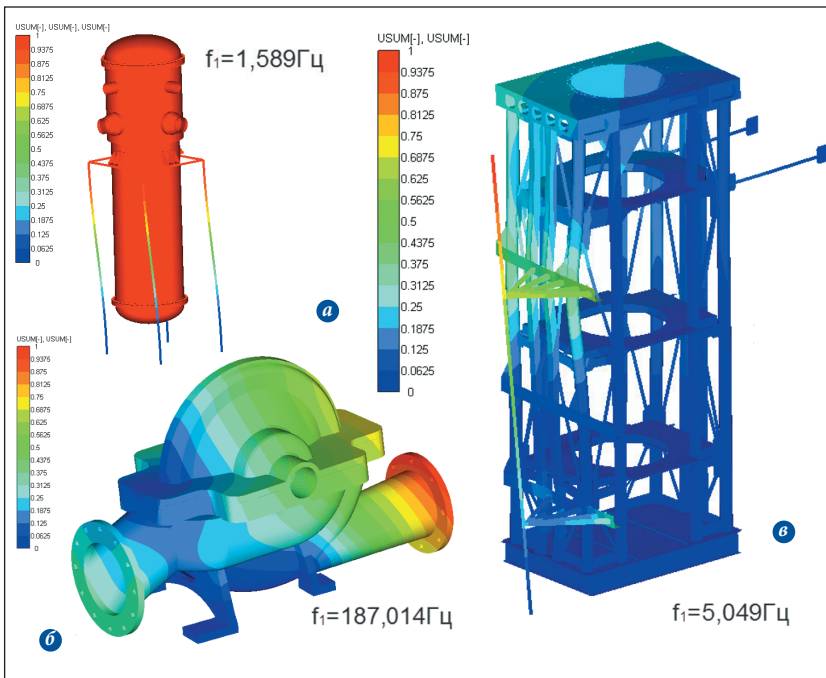


Рис. 4. Показ первых собственных частот колебаний оборудования (а, б) и строительной конструкции (в)

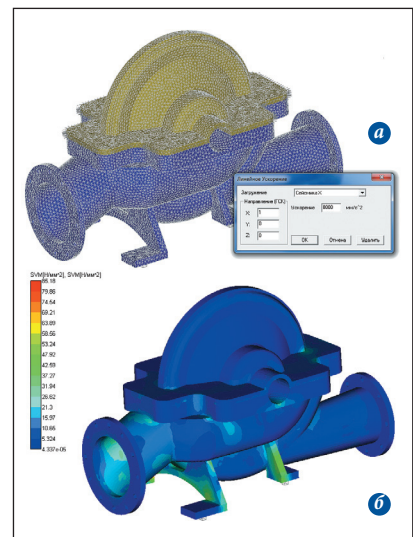


Рис. 5. Задание сейсмической нагрузки (а) и демонстрация карты напряженного состояния (б) при использовании метода эквивалентной статической нагрузки

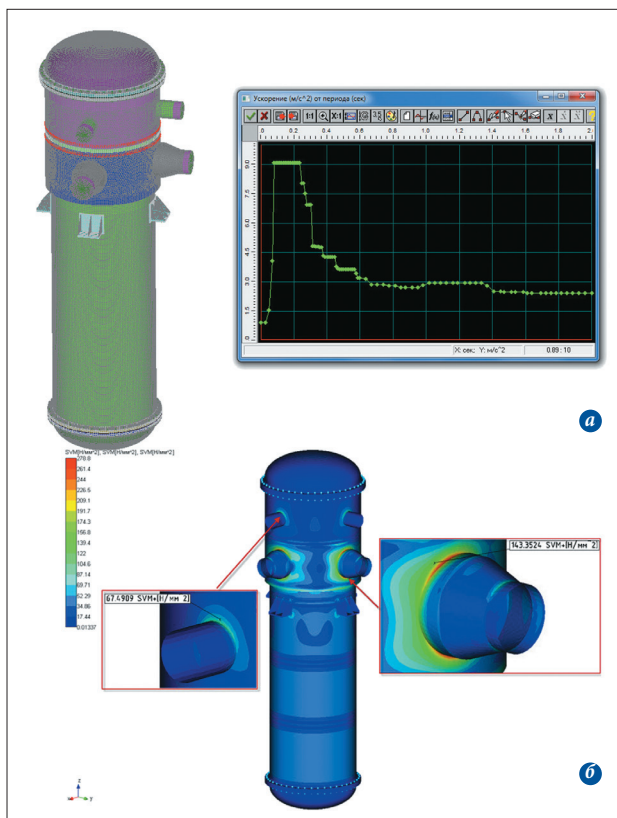


Рис. 6. Задание спектров ответа (а) и демонстрация карты напряженного состояния (б) при использовании линейно-спектрального метода

оборудование можно представить в виде сосредоточенной массы, приложенной в центре тяжести оборудования. В дальнейшем на центр тяжести оборудования накладываются связи со строительной конструкцией в местах его крепления.

Таким образом, продемонстрированные выше примеры показывают, что использование САЕ-системы АРМ WinMachine позволяет построить расчетные модели исследуемых пространственных конструкций АЭС и провести анализ их напряженно-деформируемого состояния, устойчивости, собственных частот как при нормальных условиях эксплуатации, так и при сейсмическом воздействии. Эта система в полном объеме учитывает требования государственных стандартов и правил, относящихся как к оформлению конструкторской документации, так и к расчетным алгоритмам. Использование возможностей системы АРМ WinMachine позволит сократить сроки проектирования и снизить материалоемкость конструкций,

а также уменьшить общую стоимость проектных работ.

#### Список использованных источников:

1. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии: НП-031-01 Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. — Взамен НПАЗ Г-5-006-87. Москва: [б.и.], 2002. 25 с.
2. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86). М.: Энергоатомиздат, 1989. 525 с.
3. Evaluation of Seismic Safety for Existing Nuclear Installation. Safety Standards Series NeNS-G-2.13, IAEA, Vienna, 2009.
4. Seismic Evaluation of Existing Nuclear Power Plants, Safety Reports Series № 28, IAEA, Vienna, 2003.
5. Аттестационный паспорт программного средства АРМ Structure3D (версия 10.2). Регистрационный номер 330 от 18 апреля 2013 года. ►