

# Расчеты на прочность и сейсмостойкость насосов АЭС с использованием российской САЕ-системы APM WinMachine и библиотеки APM FEM для КОМПАС-3D

Владимир Шелофаст, Ризван Шахбанов, Алексей Сухоручко

**Данная статья посвящена особенностям применения модуля APM Structure3D системы APM WinMachine при расчетах на прочность и сейсмостойкость насосов АЭС в соответствии с ПНАЭ Г-7-002-86 «Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок». Кроме того, в статье продемонстрированы результаты моделирования корпусов насосов в КОМПАС-3D с последующим наложением конечно-элементной сетки автоматическими генераторами, встроенными в APM FEM.**

Эффективное функционирование и безаварийная работа любой АЭС обусловлена надежной работой используемого оборудования. Одним из значимых типов оборудования, используемых на АЭС, являются насосы. Сам по себе насос представляет собой гидравлическую машину, которая преобразует механическую энергию в энергию потока жидкости. Насосы служат для перемещения и создания напора жидкостей всех видов. Перемещение жидкости осуществляется за счет разности давлений жидкости на выходе из насоса и присоединенном трубопроводе.

В зависимости от сил, преобладающих в насосе, они делят-

ся на объемные (преобладают силы давления) и динамические (преобладают силы инерции), причем каждый их них, в свою очередь, делится на типы, указанные на рис. 1.

В качестве основных насосов АЭС, как правило, используются лопаточные и струйные машины. Особенностью лопатных насосов является то, что за счет взаимодействия с вращающимися лопастями рабочего колеса жидкость получает приращение энергии. В рабочем колесе происходит приращение потенциальной и кинетической энергии жидкости. Кинетическая энергия в неподвижных элементах пре-

вращается в энергию давления. Действие струйных насосов основано на увлечении нагнетаемого (откачиваемого) вещества струей жидкости, пара или газа (соответственно различают жидкоструйные, пароструйные и газоструйные насосы). Они применяются для нагнетания, отсасывания и транспортирования веществ.

Первостепенное значение при проектировании любой конструкции, в том числе и насосов, имеют результаты расчета напряженно-деформированного состояния, устойчивости, теплопроводности, собственных и вынужденных колебаний. Система автоматизированного расчета и проектирования механического оборудования и конструкций в области машиностроения APM WinMachine способна решать эти задачи с применением метода конечных элементов. Очень важным является и тот факт, что модуль APM Structure3D [3], входящий в состав системы APM WinMachine, с помощью которого проводятся все необходимые расчеты, имеет сертификат

<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>Алексей Сухоручко</b>
Инженер НТЦ «АПМ».

соответствия и аттестационный паспорт программного средства, выданный Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор).

Расчеты насосов для АЭС проводятся согласно требованиям ПНАЭ Г-7-002-86 «Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок» [1] и РД ЭО 1.1.2.05.0330-2012 «Руководство по расчету на прочность оборудования и трубопроводов реакторных установок РБМК, ВВЭР и ЭПГ на станции эксплуатации, включая эксплуатацию за пределами проектного срока службы» [2] и должны включать:

- расчет на статическую прочность;
  - расчет на устойчивость;
  - расчет на циклическую прочность;
  - расчет на длительную циклическую прочность;
  - расчет на сопротивление хрупкому разрушению;
  - расчет на длительную статическую прочность;
  - расчет на прогрессирующее формоизменение;
  - расчет на сейсмические воздействия;
  - расчет на вибропрочность.
- В результате расчетов определяются величины действующей

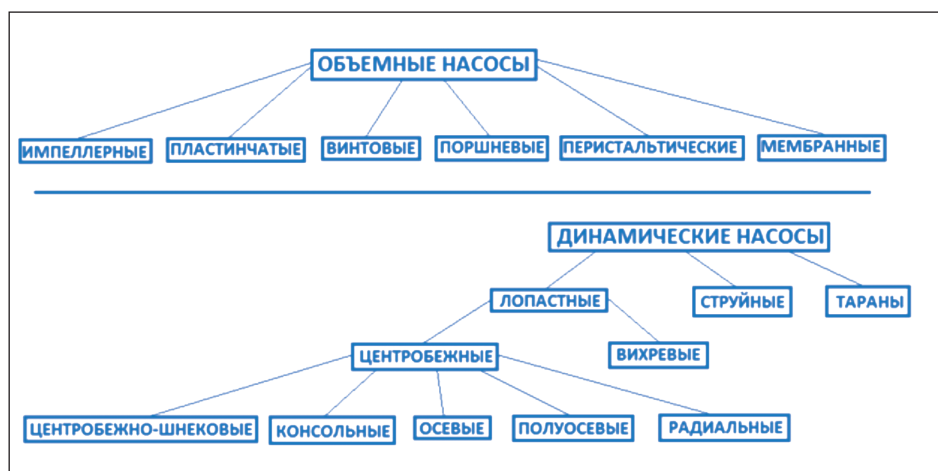


Рис. 1. Основные типы насосов

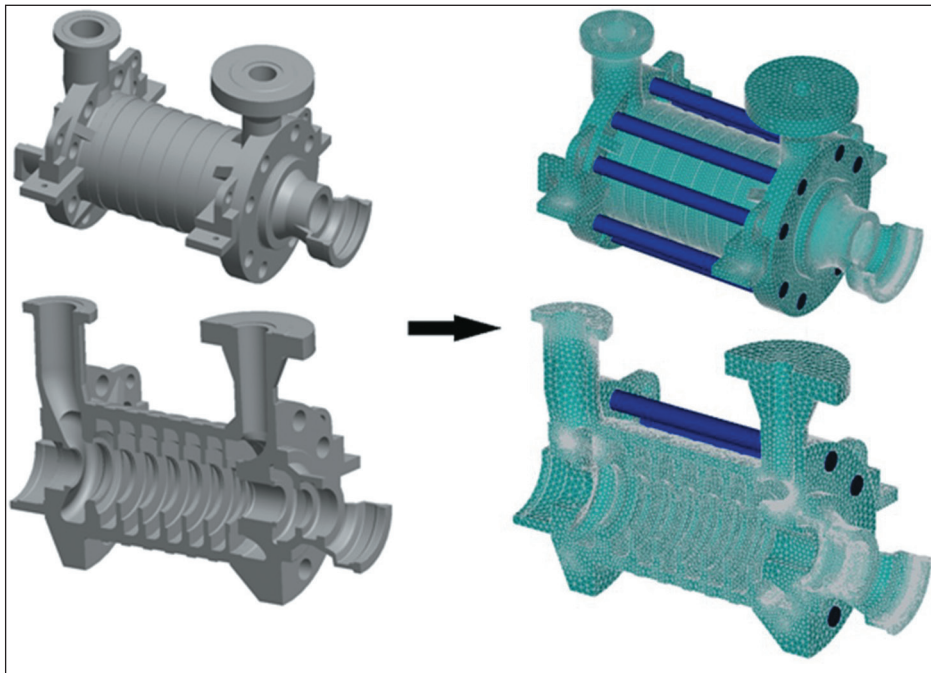


Рис. 2. Трехмерная и конечно-элементная модель насоса АПЭА 250/90

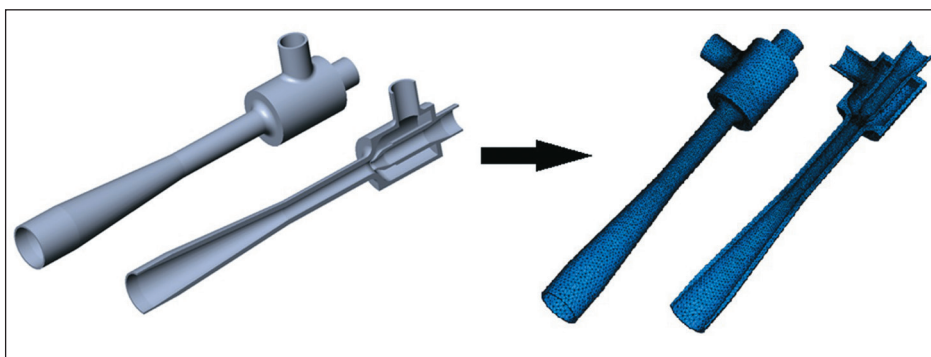


Рис. 3. Трехмерная и конечно-элементная модель насоса СН-А-10/50К

щих в конструкции напряжений и деформаций, которые сравниваются с допускаемыми значениями (расчетные группы категорий напряжений), указанными в [1].

В рамках данной статьи остановимся на следующих

типах расчетов, реализуемых в APM Structure3D и необходимых по [1]:

- расчет на статическую прочность;
- расчет на сейсмические (динамические) воздействия;
- расчет на вибропрочность.

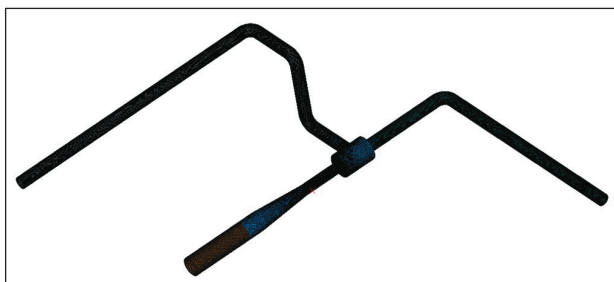


Рис. 4. Реализация учета присоединенного трубопровода

с течью теплоносителя первого контура.

Прежде чем приступить непосредственно к расчетам, необходимо создать расчетную модель. Она представляет собой упрощенную, идеализированную модель реального объекта, которая отображает самые существенные особенности, определяющие его поведение под нагрузками. В случае достаточно сложной геометрии для оптимизации процесса моделирования используется программный продукт КОМПАС-3D с последующим применением системы прочностного анализа APM FEM. Данная система позволяет, не выходя из окна КОМПАС-3D, автоматически сгенерировать конечно-элементную сетку и провести предварительные расчеты, такие как: линейный статический расчет; расчет на устойчивость; расчет собственных частот и форм колебаний; расчет задачи стационарной теплопроводности; расчет задачи термоупругости (при совместном выполнении статического и теплового расчетов). При формировании конечно-элементной сетки в APM FEM пользователю предоставляется на выбор два вида объемных КЭ: 4- и 10-узловые тетраэдры. В целях экономии памяти и ресурсов компьютера при обеспечении точности расчета рекомендуется использовать 10-узловые тетраэдры. Данные элементы имеют три степени свободы в каждом узле и позволяют использовать больший шаг разбиения по сравнению с 4-узловыми тетраэдрами. В случае формирования в APM FEM объемной сетки из 4-узловых тетраэдров возможно автоматически передать файл с КЭ-сеткой в модуль APM Structure3D, где реализована возможность повышения порядка объемных элементов.

На рис. 2 и 3 представлены трехмерные и конечно-элементные модели рассматриваемых насосов, полученные в результате моделирования в

В качестве наглядного примера рассмотрим расчеты следующих насосов: горизонтальный центробежный секционный многоступенчатый насос АПЭА 250/90 и водоструйный насос СН-А-10/50К.

АПЭА 250/90 — вспомогательный питательный насос, который предназначен для подачи питательной воды в парогенераторы блоков ВВЭР-1200, а также может быть использован в качестве питательного насоса в энергоустановках.

Насос СН-А-10/50К предназначен для подачи рабочей среды к насосам расхолаживания первого контура и охлаждения бассейна выдержки при авариях

КОМПАС-3D с последующей генерацией КЭ-сетки средствами APM FEM.

Для более детального анализа из APM FEM конечно-элементная модель насоса экспортируется в модуль APM Structure3D. Для этого сохраняется файл формата FRM, который содержит в себе как информацию о сетке конечных элементов (геометрии элементов, параметрах материала), так и граничные условия (нагрузки и закрепления), ранее заданные пользователем.

При формировании кинематических граничных условий для расчета насосов необходимо учитывать ряд особенностей. В случае с насосом АПЭА 250/90 кинематические условия задаются в виде запрета всех перемещений и моментов в зонах установки крепежных болтов. При моделировании же насоса СН-А-10/50К необходимо учесть конструкцию присоединяемого трубопровода и следует задавать закрепления уже участкам трубопроводов согласно их установке в общей системе (рис. 4).

Статическая прочность элементов оборудования, согласно [1], [2], проверяется для групп категорий напряжений  $(\sigma)_1$ ,  $(\sigma)_2$ ,  $(\sigma)_{RV}$  и для насосов включает следующие нагрузки: собственный вес, давление нормальной эксплуатации (НЭ), давление гидроиспытаний (ГИ), затяжка шпилек, нагрузки на патрубки от подсоединяемых трубопроводов и температура рабочей среды.

Рабочее давление и давление гидроиспытаний задается в виде распределенной нагрузки на внутренние полости насоса (рис. 5). Каждая из нагрузок при этом попадает в свое «загружение», чтобы в дальнейшем было удобно создавать расчетные комбинации загружений.

Усилия от затяжки шпилек, используемых для присоединения фланцев насо-

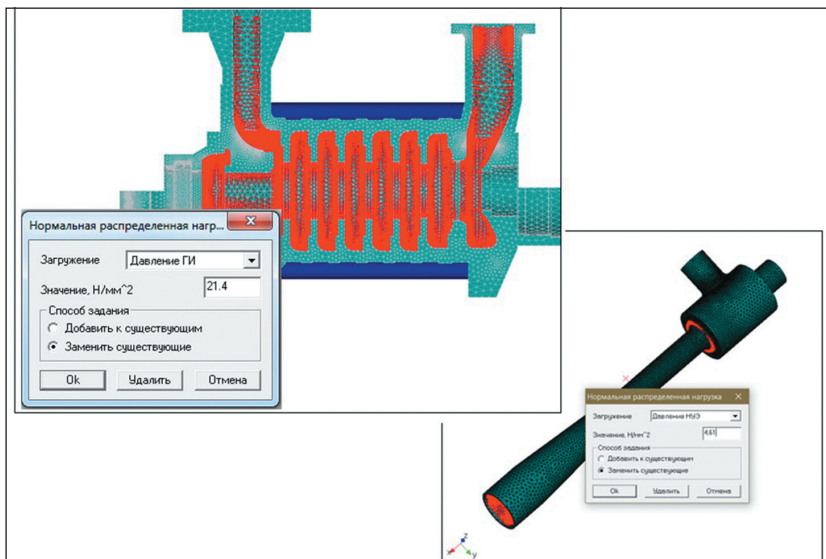


Рис. 5. Пример приложения внутреннего давления

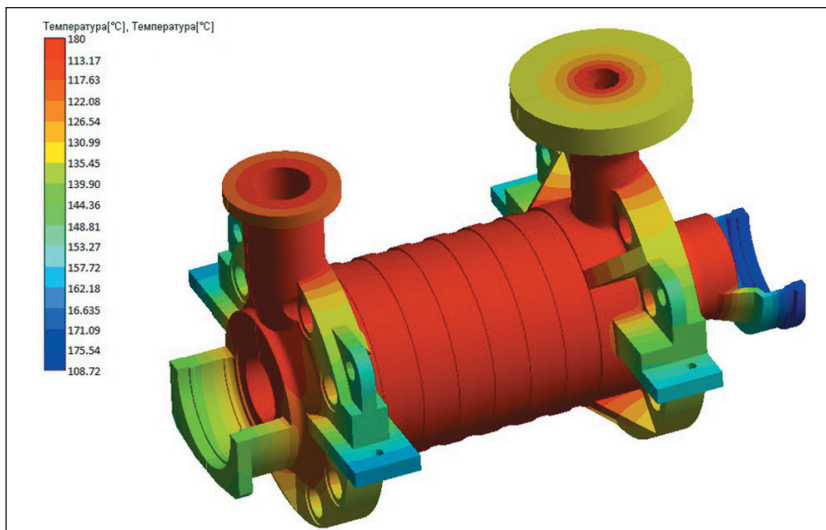


Рис. 6. Распределение температурных полей в режиме НЭ

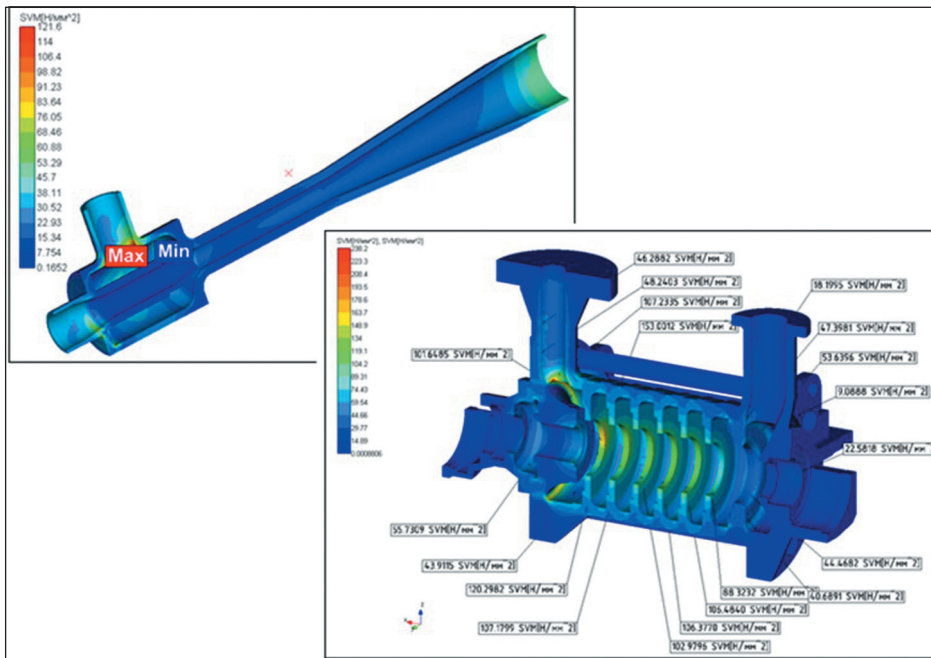


Рис. 7. Результаты расчета приведенных (эквивалентных) напряжений, МПа

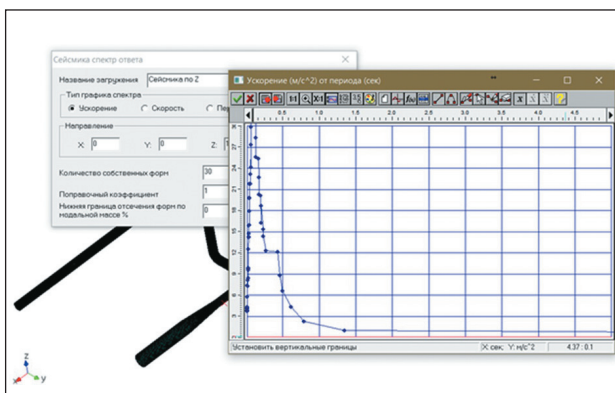


Рис. 8. Пример учета обобщенных спектров отклика

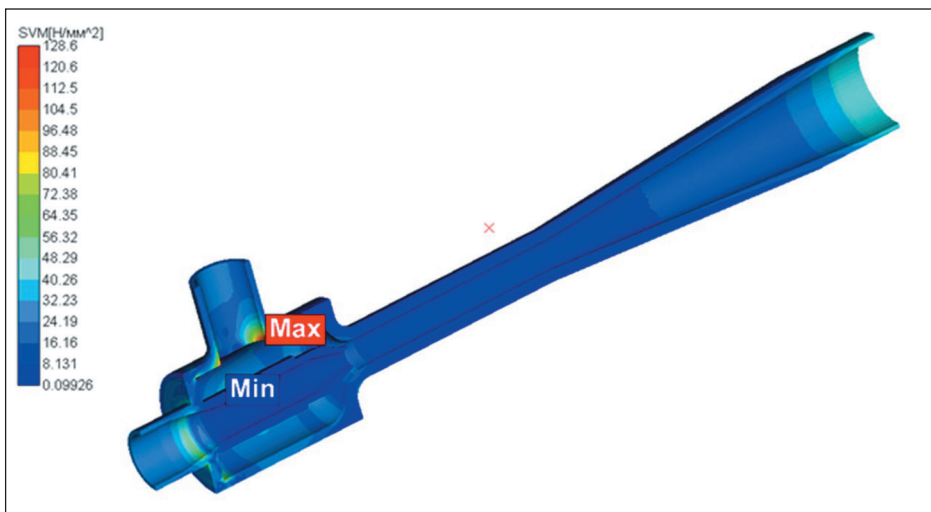


Рис. 9. Пример распределения приведенных (эквивалентных) напряжений от сейсмических нагрузок

неравномерно прогревающейся толщиной стенки необходимо проводить расчет нестационарной теплопроводности, основанный на законе Фурье — Кирхгофа. В этом случае необходимо задать распределение температуры рабочей среды в начальный момент времени и конвективный теплообмен. На рис. 6 представлено распределение температурных полей в результате нестационарного теплового анализа насоса АПЭА 250/90.

Пример вывода результатов расчета приведенных (эквивалентных) напряжений в корпусах насосов для одной из комбинаций нагрузок представлен на рис. 7.

Оценка прочности при сейсмических воздействиях проводится для групп категорий напряжений ( $\sigma_{s1}$  и  $\sigma_{s2}$  по [1] и [2] и включает в себя следующий набор нагрузок: собственный вес, давление нормальной эксплуатации (НЭ), затяжка шпилек, нагрузки на патрубки от подсоединяемых трубопроводов и сейсмические нагрузки.

Сейсмические нагрузки определяются с использованием обобщенных спектров отклика уровня ПЗ (проектное землетрясение) или МРЗ (максимальное расчетное землетрясение) для отметки фундаментной плиты в соответствии с техническим заданием на расчет. Согласно [1], при первой собственной частоте колебаний меньше 20 Гц расчет следует проводить линейно-спектральным методом, если же первая частота больше 20 Гц, расчет допускается проводить статическим методом. Линейно-спектральный метод предполагает проведение модального анализа рассматриваемой конструкции. Расчет на собственные частоты конструкции ведется с учетом распределенной матрицы масс и заключается в решении обобщенной задачи на собственные значения.

В случае насоса СН-А-10/50К первая собственная частота

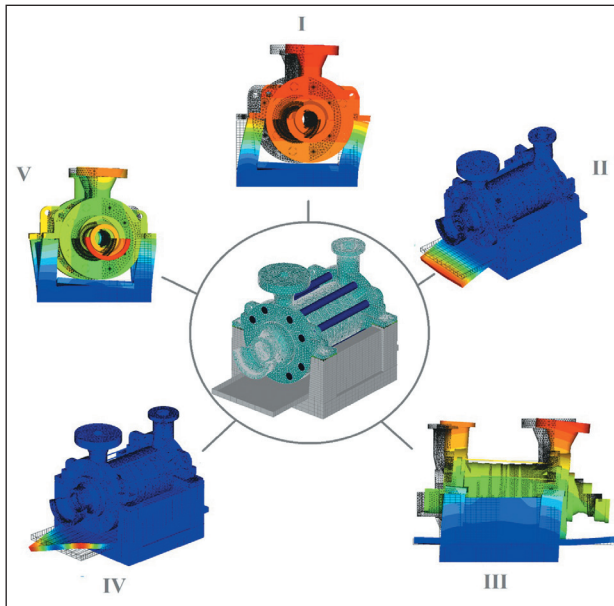


Рис. 10. Расчетная модель насоса АПЭА 250/90 с рамой и первые пять форм собственных колебаний

колебаний меньше 20 Гц, следовательно, расчет на сейсмические воздействия проводится линейно-спектральным методом. Пример учета обобщенных спектров ответа в APM Structure3D путем формирования графиков зависимости максимальных ускорений от периода колебаний представлен на рис. 8.

На рис. 9 представлены результаты расчета приведенных (эквивалентных) напряжений в корпусе насоса СН-А-10/50К от сейсмических нагрузок.

Кроме расчета на сейсмическую прочность иногда требуется провести расчеты на динамические воздействия, такие как падение самолета (ПС) и внешняя ударная волна (ВУВ). Данные расчеты выполняются аналогично — линейно-спектральным методом, и значения нагрузок задаются в виде огибающих спектров ответа. При выполнении расчетов на динамические воздействия используются критерии прочности, в соответствии с [1], предъявляемые к оборудованию при расчете на сейсмические воздействия.

Расчет на вибропрочность проводится применительно к элементам конструкции, под-

вергающимся вибрационному нагружению. Для элементов насоса в связи с вращением ротора актуальны вопросы вибропрочности. Задачами данного расчета являются определение спектра собственных частот колебаний и проверка их отстройки от детерминированных частот возмущения. Иногда модели самого насоса недостаточно для оценки вибропрочности, необходимо проводить анализ укрупненного элемента насосного агрегата. В частности, для насоса АПЭА 250/90 необходимо учесть и раму, на которой он установлен. Расчетная модель насоса с рамой, а также пять первых форм собственных колебаний приведены на рис. 10.

Подводя итог краткому обзору расчетов насосов АЭС, можно заключить, что использование CAE-систем APM WinMachine и APM FEM, разрабатываемых в НТЦ «АПМ», позволяет создавать геометрически сложные расчетные модели и проводить анализ напряженно-деформируемого состояния оборудования АЭС согласно ПНАЭ Г-7-002-86 «Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энер-

гетических установок». Таким образом, применение вышеуказанных расчетных программных продуктов возможно как на этапах проектирования, так и на этапах выполнения расчетов для продления срока службы оборудования АЭС.

**Список использованных источников:**

1. ПНАЭ Г-7-002-86 «Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок». М.: Энергоатомиздат, 1989. 525с.
2. РД ЭО 1.1.2.05.0330-2012 «Руководство по расчету на прочность оборудования и трубопроводов реакторных установок РБМК, ВВЭР и ЭПГ на станции эксплуатации, включая эксплуатацию за пределами проектного срока службы». М.: ОАО «НИКИЭТ», ООО «ИЦД НИКИЭТ», 2012. 179.
3. APM Structure3D. Свидетельство о государственной регистрации программы № 2014614236 от 21.04.2014. Аттестационный паспорт программного средства № 330 от 18.04.2013. ◀

Реклама

Optimal solutions in construction and machine engineering

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

WinMachine