

СЕКЦИЯ № 4 «РАСЧЕТЫ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ АКТИВНЫХ ЗОН, ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ ОИАЭ»

В.С. Рубцов, к.т.н., ФБУ «НТЦ ЯРБ»

Важное место в обосновании безопасности объектов использования атомной энергии занимают проблемы прочности и ресурса элементов активной зоны реакторов, а также оборудования и трубопроводов энергоблоков АЭС. При этом в настоящее время указанные проблемы становятся все более актуальными по следующим причинам:

проектный срок службы оборудования и трубопроводов проектируемых и строящихся энергоблоков АЭС увеличен до 60 лет и более;

увеличивается доля энергоблоков АЭС, проектный срок эксплуатации которых закончился;

появляются энергоблоки АЭС, для которых уже закончился продленный срок эксплуатации;

происходит необратимое накопление повреждаемости металла оборудования и трубопроводов за счет циклически повторяющихся нагрузок;

происходит накопление повреждаемости металла корпусов реакторов, внутрикорпусных устройств реакторов, металлоконструкций за счет нейтронного облучения;

происходит необратимая деградация незаменимых элементов активной зоны реакторов (например, графитовой кладки);

увеличивается степень выгорания ядерного топлива.

Решение указанных проблем невозможно без использования современных аттестованных ПС, предназначенных для расчета напряженно-деформированного состояния и оценок прочности и ресурса важных для безопасности элементов АЭС.

Работа секции № 4 «Расчеты напряженно-деформированного состояния и анализ прочности элементов активных зон, оборудования и трубопроводов ОИАЭ» экспертного Совета по аттестации ПС при Ростехнадзоре во многом способствует решению указанных выше проблем.

В частности, для оценки прочности и работоспособности тепловыделяющих элементов реакторов типов ВВЭР, РБМК и БН были аттестованы следующие ПС:

«СТАРТ-3А» (АО «ВНИИНМ»); «КОРАТ» (АО «ВНИИНМ»); «ТОПРА-2» (НИЦ «Курчатовский институт»); «PINCOD» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»); «VIKOND2» (АО «ГНЦ НИИАР»); «РАПТА 5.2» (АО «ВНИИНМ»).

Для оценки прочности и работоспособности тепловыделяющих сборок реакторов ВВЭР и БН были аттестованы ПС «АСМЕ» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ») и «FAME_N1» (АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»).

Для оценки прочности труб технологических каналов реакторов типа РБМК было аттестовано ПС «КАТРАН 2» (АО «НИКИЭТ»).

Для оценки прочности и работоспособности графитовой кладки реакторов типа РБМК были аттестованы ПС «FEMGR» и «РГБ.2» (НИЦ «Курчатовский институт»).

Для оценки прочности и работоспособности трубопроводов ОИАЭ аттестованы следующие ПС: «dPIPE 5» (ООО «ЦКТИ-ВИБРОСЕЙСМ»); «АСТРА-АЭС» (ЗАО НИЦ СтаДиО); «RANT-1» (АО «ОКБМ Африкантов»).

Следует отметить, что указанные выше программные средства имеют узкую специализированную направленность, обусловленную спецификой конструкции элементов активных зон реакторов или спецификой нормативных требований по оценке прочности трубопроводов ОИАЭ. Однако большая часть оборудования и трубопроводов ОИАЭ рассчитывается на прочность с помощью универсальных программных комплексов, основанных на методе конечных элементов. Для этой цели ведущие конструкторские организации используют прошедшие процедуру аттестации отечественные программные комплексы:

«ЗЕНИТ-95» (Научно-техническое предприятие «ДИП»);

«ДИНАМИКА-3» (АО «ОКБМ Африкантов»);

«ARMStructure3D» (ООО НТЦ «АПМ»);

«UMB ВК УПАКС» (АО «ОКБМ Африкантов» и НИИ Механики при ННГУ);

«КАДР-97» (АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»);

«ДАНКО+ГЕПАРД» (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»).

Наряду с отечественными программными комплексами ведущие конструкторские организации также широко используют прошедшие процедуру аттестации зарубежные ПС, например «ANSYS», «SOLVIA SYSTEM», «COSMOS/M», «MSC.ADAMS», «MSC.Nastran», «Solidworks Simulation», «Marc 2005» и др.

Аттестовано также достаточно большое количество программных средств, имеющих вспомогательные функции, предназначенные для автоматизации расчетов на прочность при проектировании и конструировании оборудования и трубопроводов и реализующие отдельные требования федеральных норм и правил и иных нормативных документов в области использования атомной энергии.

Несмотря на большое количество аттестованных программных средств, проблема достоверности результатов по анализу прочности и ресурса элементов активной зоны реакторов, а также оборудования и трубопроводов энергоблоков АЭС, по-прежнему актуальна.

Основные причины возникновения погрешностей расчетов на прочность являются следующие:

наличие погрешностей при задании физико-механических характеристик материалов (модуль упругости, предел текучести, предел прочности, относительное удлинение, коэффициенты анизотропии, распухание, скорость ползучести и т.д.);

неверное применение типов конечных элементов для расчетов;

погрешности самих конечных элементов при неудачной аппроксимации конструкции сеткой конечных элементов (чаще при автоматизированных процессах аппроксимации);

недостаточная густота конечно-элементной сетки;

некорректное задание граничных условий;

погрешность самих вычислений.

По поводу погрешностей при задании физико-механических характеристик материалов следует отметить, что при расчете напряженно-деформированного состояния оборудования и трубопроводов в соответствии с требованиями федеральных норм и правил в области использования атомной энергии ПНАЭ Г-7-002-86 [1] и НП-089-15 [2] расчеты, как правило, выполняются в пределах упругости (это около 95 % всех расчетов). В температурном диапазоне от 20 до 350 о С необходимые для расчетов в рамках упругости механические характеристики сталей, включенных в «Сводный перечень документов по стандартизации в области использования атомной энергии» [3], достаточно хорошо изучены и слабо зависят от каких-либо факторов, поэтому для расчетов напряженно-деформированного состояния погрешность расчетов, обусловленная неопределенностью свойств материалов, как правило, не превышает 5 %.

Для указанного класса задач существенные погрешности возникают только при анализе прочности в соответствии с критериями ПНАЭ Г-7-002-86 [1], так как в этом случае используются имеющие большой разброс механические характеристики, такие как предел текучести, предел прочности, вязкость разрушения и др. Значения таких характеристик приведены в ПНАЭ Г-7-002-86 [1] в виде минимальных гарантированных значений (нижние огибающие экспериментальных точек), поэтому все погрешности при анализе прочности идут в запас прочности.

Ситуация совершенно иная, когда область применения выходит за рамки, определенные в ПНАЭ Г-7-002-86 [1] и НП-089-15 [2]: при проведении расчетов элементов активных зон, графитовой кладки и внутрикорпусных устройств реакторов, когда имеют место анизотропия механических свойств, ползучесть, усадка/распухание, радиационный рост, изменение всех характеристик при облучении, изменение характеристик в зависимости от типа напряженного состояния, фазовые переходы и т.д. В указанных случаях физико-механические характеристики материалов, несмотря на имеющийся опыт эксплуатации, всё еще недостаточно изучены и не регламентированы нормативными документами, поэтому при расчетах на прочность погрешность расчетов, обусловленная неопределенностью свойств материалов, может превышать 100 %.

При больших неопределенностях физико-механических характеристик материалов теряет смысл не только аттестация программ, но и сами расчеты, так как в подобных случаях результаты расчетов превращаются в прогнозы с сомнительной достоверностью. По мнению автора, выходом из данного положения является регламентация свойств материалов в виде стандартов, предусмотренных Постановлением Правительства РФ от 01.03.2013 № 173 [4] и включение этих стандартов в «Сводный перечень документов по стандартизации в области использования атомной энергии» [3]. При отсутствии таких стандартов достоверность используемых в расчетах на прочность физико-механических характеристик материалов должна быть обоснована организацией, выполняющей расчет, и должна анализироваться при экспертизе в рамках процедуры лицензирования.

По поводу погрешностей, обусловленных неверным применением типов конечных элементов для расчетов напряженно-деформированного состояния, следует отметить, что погрешности расчетов в подобных случаях также могут превышать 100 %. Примером подобных случаев может служить использование конечных элементов балочного типа для расчета напряжений в цилиндрических телах, длина которых равна или меньше диаметра. Подобные случаи имеют место исключительно из-за недостаточной квалификации пользователя ПС. С одной стороны, погрешности расчетов, обусловленные неверным применением типов конечных элементов, должны минимизироваться повышением квалификации пользователя ПС,

а с другой стороны, корректность применения различных типов конечных элементов должна контролироваться экспертами при проведении экспертизы расчетов на прочность в рамках процедуры лицензирования.

Аналогичная ситуация имеет место с погрешностями самих конечных элементов при неудачной аппроксимации конструкции сеткой конечных элементов (например, при наличии элементов, вытянутых в одном направлении), недостаточной густоте конечно-элементной сетки (густота сетки не позволяет корректно рассчитать концентрацию напряжений), некорректным заданием граничных условий. Такие погрешности также должны минимизироваться повышением квалификации пользователя программного средства и контролироваться экспертами при проведении экспертизы расчетов на прочность в рамках процедуры лицензирования.

Погрешность самих вычислений по программным средствам, основанным на методе конечных элементов, зависит от метода решения системы алгебраических уравнений и, как правило, не превышает 1 %. Однако при увеличении количества узлов конечно-элементных моделей до нескольких сотен тысяч и более она может возрасти, вследствие чего погрешность расчетов данного типа должна быть привязана к максимальной размерности задач, используемых при верификации программного средства.

Заключение

Процедура аттестации ПС, полезность которой не подвергается сомнению, ещё не гарантирует достижения корректных результатов расчетов на прочность. Ошибки в результатах расчетов могут возникнуть из-за:

- недостовверных свойств материалов;
- неверного применения конечных элементов;
- недостатков самих конечных элементов;
- недостаточности густоты конечно-элементной сетки;
- неверных граничных условий;
- погрешностью численных методов, используемых для решения уравнений.

Избежать возникновения существенных ошибок в расчетах на прочность можно только совместными усилиями пользователей ПС (в части повышения квалификации до уровня, минимизирующего величины погрешностей), экспертов секции № 4 Совета по аттестации (в части формулировки ограничений на применение программных средств и формулировки требований, необходимых для не превышения указанных в проекте аттестационного паспорта погрешностей ПС), а также экспертов, проводящих экспертизу самих расчетов на прочность в рамках процедуры лицензирования.

Литература

1. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. - М.: «Энергоатомиздат», 1989 г.
2. НП-089-15. «Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок». – М.: НТЦ ЯРБ, 2015 г.
3. Сводный перечень документов по стандартизации в области использования атомной энергии.- М.: ГК «Росатом», 2016 г.
4. Постановление Правительства РФ от 01.03.2013 № 173 «Об утверждении Положения об особенностях стандартизации продукции (работ, услуг), для которой устанавливаются требования, связанные с обеспечением безопасности в области использования атомной энергии, а также процессов проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации, утилизации и захоронения указанной продукции».

