

## СЕКЦИЯ № 6 «РАСЧЕТЫ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ОИАЭ И ИХ РЕАКЦИИ НА ВНЕШНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ»

*И.В. Калиберда, д.т.н. (ФБУ «НТЦ Энергобезопасность»),  
С.С. Нефедов, к.т.н., Т.З. Югай (ФБУ «НТЦ ЯРБ»)*

### **1. Особенности расчётов строительных конструкций объектов использования атомной энергии**

В соответствии с определениями федеральных норм и правил [1 – 3] строительные конструкции наряду с оборудованием, трубопроводами, средствами измерения и др. являются «элементами» объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) и в качестве таковых вносят вклад в обеспечение их надёжности и безопасности. Этот вклад определяется способностью СК выполнять предусмотренные для них проектом ОИАЭ функции с учётом воздействий, которым они могут подвергаться в процессе возведения, пуско-наладочных испытаний и эксплуатации ОИАЭ.

В зависимости от выполняемых функций к строительным конструкциям ОИАЭ предъявляются различные требования, в том числе:

- по прочности и устойчивости,
- по герметичности,
- по обеспечению биологической защиты,
- по долговечности в соответствии со сроком службы ОИАЭ и др.

Основной объём расчётов связан с обоснованием прочности и устойчивости строительных конструкций при внешних и внутренних воздействиях, учёт которых предусмотрен нормативными документами. Расчёты прочности и устойчивости СК зданий и сооружений характеризуются рядом особенностей, отличающих их от расчётов других систем и элементов ОИАЭ.

Первая из этих особенностей состоит в необходимости учёта взаимодействия сооружения с грунтовым основанием. Деформации грунтового основания определяют линейную осадку и крен сооружения, предельные значения которых нормируются, исходя из условий, необходимых для работы оборудования и трубопроводов ОИАЭ. Взаимодействием с грунтовым основанием определяются первые формы колебаний сооружения, в основном определяющие его реакцию на динамические, в том числе сейсмические, воздействия. Учёт этого взаимодействия требует введения грунтового основания в расчётную модель сооружения. В наиболее распространённых в настоящее время расчётах с использованием метода конечных элементов применяются два метода моделирования грунтового основания. Первый

метод состоит в прямом введении в модель массива грунта, его разбиении на конечные элементы и назначении свойств конечных элементов в соответствии с реальными упругими и вязкими характеристиками слоёв грунта. Этот метод даёт возможность реалистического моделирования, но значительно увеличивает размерность задачи. Второй метод - представление грунта упруго-вязкими элементами (пружинами и демпферами) с использованием модели Максвелла. Этот метод позволяет экономить вычислительные ресурсы, но требует предварительных расчётов по определению эквивалентных характеристик пружин и демпферов. При использовании обоих методов адекватность моделирования грунта должна быть обоснована.

Другая особенность связана с использованием в строительных конструкциях бетона, кирпича и других строительных материалов. Диаграммы деформирования этих материалов существенно отличаются от диаграмм деформирования стали и других металлов. Сталь работает упруго как при растяжении, так и при сжатии до высоких уровней напряжений, после чего переходит в пластическую стадию работы. Бетон при сжатии работает упруго-пластически, проявляя пластические свойства уже при средних уровнях напряжений. При растяжении бетон, как и другие строительные материалы, работает хрупко и разрушается при малых уровнях напряжений. Особенности работы строительных материалов должны учитываться в ПС, предназначенных для расчёта строительных конструкций.

Расчёты СК регламентируются строительными нормами и правилами, устанавливающими методики проверки прочности металлических, железобетонных конструкций и конструкций из других материалов. В соответствии с Федеральным законом N384-ФЗ [4] и постановлением Правительства №1521 от 30.12.2009 [5] эти методики являются обязательными для применения. В результате расчёт строительных конструкций распадается на два этапа: анализ напряжённо-деформированного состояния (НДС) конструкции и проверка прочности и армирования. Анализ НДС выполняется методами механики, применение которых обосновывается разработчиком ПС, а проверка прочности и армирования – по нормативным методикам СНиП. Этим ограничивается применение зарубежных ПС, которые могут использоваться только на первом этапе расчёта.

Расчёты строительных конструкций ОИАЭ имеют специфику по отношению к расчётам в общестроительной практике. В основном эта специфика касается особенностей конструктивных решений строительных конструкций ОИАЭ и необходимости учёта особых нагрузок и воздействий высокой интенсивности.

Особенности конструктивных решений строительных конструкций характеризуются широким применением на ОИАЭ:

- массивных конструкций биологической защиты персонала и окружающей среды от ионизирующего излучения;
- пространственных конструкций типа защитных оболочек, необходимых для формирования герметичного ограждения вокруг реакторных установок;
- стальной облицовки железобетонных конструкций.

Для подобных конструкций в СНиП отсутствуют методики проверки прочности. Для проверки прочности таких конструкций в расчётах используются оригинальные методики, основанные на эксперименте, либо методики из зарубежных норм. Правомерность применения этих методик является вопросом экспертизы

расчётных обоснований безопасности ОИАЭ, а также вопросом верификации ПС, в которые эти методики заложены.

Нормативными документами [6 – 8] для СК, которые влияют на безопасность ОИАЭ, предусмотрен учёт интенсивных внутренних и внешних воздействий. К ним относятся внутренние воздействия (давление и температура), которые могут возникать в аварийных режимах эксплуатации ОИАЭ, а также экстремальные внешние воздействия природного и техногенного происхождения. К воздействиям природного происхождения относятся экстремальные ветровые и снеговые нагрузки, а также сейсмические нагрузки максимального расчётного землетрясения повторяемостью 1 раз в 10 тыс. лет. К воздействиям техногенного происхождения относятся воздействия аварийных взрывов на площадке или за пределами площадки объекта, а также воздействия, связанные с падением летательных аппаратов (удар, воздействие пламени и др.). Анализ работы СК при этих воздействиях требует учёта работы конструкционных материалов за пределом упругости вплоть до предельного равновесия конструкции, которое является границей «порогового эффекта» («cliff-edge effect»). Оценка этой границы при аварийных нагрузках, а также при сейсмическом воздействии предусматривается руководствами МАГАТЭ [9, 10]. Необходимые для этого расчёты СК требуют использования нелинейного математического аппарата.

## **2. Практика и итоги аттестации ПС для расчёта строительных конструкций ОИАЭ**

Для оценки применимости ПС, предназначенных для расчётов строительных конструкций, используемых при обосновании безопасности ОИАЭ, в рамках экспертного Совета по аттестации программных средств при Ростехнадзоре в 1991 г. была организована секция «Параметры поведения конструкций, оборудования и трубопроводов при статических и динамических нагрузках». Организатором и первым председателем секции была д.т.н. И.В. Калиберда.

Рассматриваемые секцией ПС используются для определения следующих параметров:

1. Нагрузки и воздействия на здания, сооружения, конструкции, оборудование, трубопроводы объектов использования атомной энергии.
2. Параметры колебаний, прочность и устойчивость системы» грунт-фундамент – сооружение».
3. Параметры колебаний, прочность и устойчивость трубопроводов и оборудования атомных станций.

Первые годы работы секции были периодом выработки регламента и формирования её состава. Кроме решения организационных задач на первых этапах работы секции необходимо было:

- изучить существующие подходы к обеспечению качества ПС;
- выявить и классифицировать причины, влияющие на результаты расчета;
- разработать требования к верификации ПС, учитывающие особенности расчётов СК, описанные в первом разделе настоящей статьи;
- разработать тестовые примеры для верификации ПС в части учета взаимодействия сооружения с основанием, расчетов оборудования, трубопроводов и конструкций.
- создать банк экспериментальных данных по испытанию зданий и сооружений на динамические воздействия.

Первые ПС были аттестованы в 1993 г. ПС «SASSI», «AGA», «SHAKE», «CLASSI», «STRUDYN», предназначенные для расчёта параметров сейсмического воздействия на здания АЭС с учётом их взаимодействия с основанием. В [11] изложены некоторые результаты экспертизы ПС за период с 1991 г. по 2000 г. В статье [12] обсуждаются вопросы обеспечения качества и надёжности программных средств, используемых для обоснования безопасности в области прочности и устойчивости к внешним воздействиям.

В настоящее время в состав секции № 6 входят специалисты из 15 ведущих научно-технических организаций, занимающихся разработкой ПС и расчётами строительных конструкций ОИАЭ. В настоящее время в секции работают 30 высококвалифицированных специалистов, в том числе 10 кандидатов и 9 докторов наук.

Итогом работы секции являются аттестованные ПС, которые могут обоснованно применяться для расчётов СК, используемых в обоснованиях безопасности ОИАЭ. В таблице приведены 12 аттестованных ПС, аттестационные паспорта которых действуют в настоящее время.

**Таблица**

**Аттестованные ПС для расчёта СК ОИАЭ**

Наименование	Назначение ПС
SASSI2000	Расчёт сейсмических воздействий на здания и сооружения АЭС с учётом взаимодействия с основанием
AGA	
SHAKE	
УДАР	Расчет железобетонных конструкций на удар самолёта с учётом неупругих деформаций.
АСТАН ПУЧОК	Расчет железобетонных защитных оболочек
CONT	
СОБЕФ	
ТЕРМИТ	Расчет герметизирующей стальной облицовки защитных оболочек АЭС.
STARDYNE	Расчёт СК при динамических воздействиях
MicroFe	Конечно-элементные комплексы программ для расчёта СК на статические и динамические воздействия
Nastran	
ОМ СНиП Железобетон	Проверка прочности и армирования железобетонных СК по СНиП

Опыт работы секции выявил ряд проблем, возникающих при верификации ПС для расчёта СК ОИАЭ. Основной из этих проблем является ограниченность экспериментальной базы для верификации ПС. В основном в верификационных тестах сопоставление результатов расчёта проводится с теоретическими решениями. С таким подходом можно согласиться, когда речь идёт о расчётах, выполненных применительно к хорошо изученным «хрестоматийным» конструкциям (балки, пластинки и т.п.), работающим на статическую нагрузку в пределах упругости. Для более сложных пространственных конструкций, работающих на нестационарные динамические воздействия или на статические воздействия за пределами упругого деформирования, найти надёжные теоретические решения удаётся далеко не всегда. В таких случаях требуется получение экспериментальных данных, необходимых для обоснования расчетной модели ПС.

Тем более ценными для верификации ПС являются примеры сопоставления результатов счёта и натурных испытаний конструкций, имеющиеся в некоторых верификационных отчетах. Примером является отчет о верификации ПС «СОВЕФ» (разработчик АО «Атомэнергопроект», Москва), в котором результаты расчёта защитной оболочки на внутреннее давление сопоставляются с экспериментальными данными, полученными в процессе пневматических испытаний реальной защитной оболочки АЭС. Другим примером является верификационный отчет ПС Nastran (разработчик АО «АТОМПРОЕКТ», Санкт-Петербург), в котором проведено сравнение результатов расчёта амплитудно-частотной характеристики фундамента турбогенератора с экспериментальными данными, полученными на площадке реальной АЭС. Подобные экспериментально обоснованные тесты было бы целесообразно использовать и при верификации других ПС в процессе работы секции. Также было бы целесообразно повторное применение удачных тестовых примеров аналитического характера, отличающихся убедительностью, которые в ряде случаев предлагаются разработчиками ВО. В некоторых случаях заявители сами обращаются с просьбой предоставить им тесты, которые удовлетворяли бы требованиям секции.

#### **Заключение**

Сегодня накоплен уже достаточный опыт аттестации ПС, используемых для расчета строительных конструкций и их реакций на внешние воздействия. Безусловно, оценки строительных конструкций на статические и квазистатические нагрузки составляют основу оценок поведения и реакций конструкций на динамические воздействия. Вопросы проектирования конструкций, выбора их конструктивных решений возможно только на основании надёжных расчетных исследований, выполненных с применением аттестованных ПС.

#### **Литература**

1. НП-001-15. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2015.
2. НП-033-11. Общие положения обеспечения безопасности исследовательских ядерных установок. - М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2011.
3. НП-016-05. Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла (ОПБ ОЯТЦ). – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2005.
4. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: Федеральный Закон от 30 декабря 2009 № 384–ФЗ.
5. Об утверждении перечня национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»: Постановление правительства РФ от 26 декабря 2014 № 1521.
6. ПиН АЭ-5.6. Нормы строительного проектирования атомных станций с реакторами различного типа, 1986.
7. НП-031-01. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2001.
8. НП-064-05. Учёт внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии.- М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2005.

9. NS-G-1.10. Проектирование систем защитной оболочки реактора для атомных электростанций/Серия норм по безопасности .- МАГАТЭ, Вена, 2004.

10. NS-G-2.13. Оценка сейсмической безопасности существующих ядерных установок/ Серия норм по безопасности.- МАГАТЭ, Вена, 2014.

11. Калиберда И.В., Ковалевич О.М., Рубцов В.С., Туляков П.В., Уголева И.Р. Об аттестации программных средств и экспертизе расчетных обоснований прочности и устойчивости оборудования и трубопроводов ОИАЭ.//1-я конференция «Методы и программное обеспечение расчетов на прочность»./Россия, г. Туапсе, 9 - 14 октября 2000.

12. Калиберда И.В. Качество и надёжность программных средств, используемых для обоснований безопасности в области прочности и устойчивости к внешним воздействиям.- Вестник Госатомнадзора России, № 1 (25), 2003.

