

Проектирование атомных электростанций



В Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого модернизируют подходы к проектированию атомных электростанций, опираясь на передовые численные методы и современные программные комплексы конечно-элементного анализа. Это позволяет точнее описывать сложные мультифизические процессы в оборудовании и строительных конструкциях АЭС и, как следствие, снижать избыточную консервативность проектных решений и стоимость строительства новых энергоблоков.

Зачем модернизировать проектирование АЭС

Традиционно при проектировании атомных станций применяются упрощенные математические модели и консервативные допущения, сформированные в эпоху ограниченных вычислительных ресурсов и недостаточного развития численных методов для описания нелинейных физически связанных процессов. Это требовало использования крупных коэффициентов запаса при выборе толщины оболочек, оценке максимальных нагрузок и диапазонов условий эксплуатации, что приводило к повышенной металлоемкости и удорожанию сооружений.

Инженеры Политеха развивают и внедряют в проектирование АЭС новые подходы цифрового инжиниринга, которые позволяют формировать более реалистичные расчетные модели и тем самым обосновывать оптимальные, а не заведомо завышенные требования к конструкциям и оборудованию. Такой переход от «грубого» консерватизма к научно обоснованной точности напрямую влияет на экономику проектов — от стоимости материалов до сроков сооружения.

Метод синтеза динамических подструктур: меньше элементов, больше информации

Одно из ключевых направлений работы — разработка методик оценки прочности элементов конструкций АЭС в условиях сейсмических и экстремальных воздействий. В таких задачах критически важно корректно моделировать взаимодействие системы «сооружение — грунтовое основание», поскольку именно через основание сейсмические колебания передаются на корпус реакторного блока и внутреннее оборудование.

Коллектив Политеха использует метод синтеза динамических подструктур, который позволяет «свернуть» масштабную конечно-элементную модель, содержащую десятки и сотни тысяч элементов, в один суперэлемент, сохраняющий динамические свойства исходной системы. В результате корпус блока реакторной установки БР-1200 (КБР РУ БР-1200) был пересобран из модели с более чем 600 тысяч элементов в модель менее чем из 10 тысяч элементов, что более чем на 80% увеличило скорость расчета нагрузок при сейсмических и других динамических воздействиях.

Такая компрессия расчетной схемы без потери информативности открывает возможность оперативно проводить серию сценарных расчетов, учитывать вариативность параметров грунтов и внешних воздействий и переходить от единичных проверок к полноценному параметрическому анализу конструкции.

Моделирование системы «сооружение — основание» и уточнение сейсмических нагрузок

Разработанная в Политехе методика моделирования системы «сооружение — основание» учитывает реальное пространственное распределение жесткостных и диссипативных характеристик грунта и обеспечивает моделирование двустороннего динамического взаимодействия фундаментной плиты с грунтовым основанием. Это позволяет более корректно определять амплитуды и спектральный состав сейсмических движений на отметках основания корпуса реакторного блока и внутрикорпусного оборудования.

Благодаря детальному моделированию волновых процессов в грунте исследователям удалось уточнить сейсмические нагрузки и показать, что фактическая расчетная нагрузка может быть более чем вдвое ниже значений, заложенных в существующих нормативных подходах. Это создает основу для пересмотра части консервативных допущений в сторону оптимизации, не снижая, а в ряде случаев повышая уровень обоснованной безопасности конструкций.

Следующий этап работы предполагает дальнейшее развитие и автоматизацию подходов и их интеграцию в отраслевые стандарты проектирования АЭС.

Экономический эффект и вклад в технологическое лидерство

Снижение неоправданного запаса за счет более точных расчетов позволяет уменьшить металлоемкость конструкций при сохранении требуемой прочности и надежности. Одновременно становится возможной адресная идентификация зон, требующих усиления, без проведения дорогостоящих натурных испытаний, что сокращает сроки и стоимость подготовки проектной документации и этапа верификации решений.

По словам директора Научно-образовательного центра «Цифровой инжиниринг в атомной и тепловой энергетике» ПИШ СПбПУ Виктора Модестова, совокупный эффект таких решений способствует закреплению технологического лидерства России в области атомной энергетики и реализации концепции замкнутого ядерного топливного цикла на базе реакторов нового поколения.

Команда проекта и партнеры

В разработках участвуют ведущие научные сотрудники, инженеры и преподаватели Научно-образовательного центра «Цифровой инжиниринг в атомной и термоядерной энергетике» ПИШ СПбПУ и Физико-механического института СПбПУ: Алексей Лукин, Роман Федоренко, Ильнар Муртазин, Алексей Кудрявцев, Иван Попов, Александр Лобачев, Павел Удалов, Надежда Пискун. Проект реализуется в партнерстве с АО «НИКИЭТ» и АО «Обуховский завод» при поддержке федеральной [программы «Приоритет-2030»](#).

Такое кооперационное взаимодействие академической среды, конструкторских бюро и машиностроительных предприятий обеспечивает быстрый путь от академических разработок до отраслевых стандартов и реальных инженерных практик.

Связь с образовательными программами

Передовые методы цифрового моделирования, используемые при проектировании АЭС, уже интегрированы в учебный процесс магистерской программы «Цифровой инжиниринг в атомной и термоядерной энергетике» по направлению 15.04.03 «Прикладная механика». Программа реализуется в Передовой инженерной школе «Цифровой инжиниринг» и разработана совместно с индустриальными партнерами — АО «Атомэнергопроект», АО «НИКИЭТ», Физико-техническим институтом им. А. Ф. Иоффе РАН и Институтом ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН.

Это позволяет готовить инженеров, которые не только владеют фундаментальными знаниями по механике и физике сложных энергоустановок, но и умеют применять современные инструменты цифрового инжиниринга для решения задач сейсмостойкости, прочности и надежности атомных объектов. В дальнейших планах команды — разработка методики расчета вибропрочности корпуса реакторного блока с учетом двустороннего гидроупругого взаимодействия конструкций с жидкометаллическим теплоносителем.