

## РАЗВИТИЕ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «ВИРТУАЛЬНЫЙ ЭНЕРГОБЛОК АЭС» И РАСШИРЕНИЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НА ЭНЕРГОБЛОКИ С РЕАКТОРОМ БН-1200

Д. В. Капица, Е. П. Образцов, В. Б. Козлов, В. А. Болнов<sup>1</sup>, И. С. Зотов<sup>1</sup>

АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт  
энергетических технологий «АТОМПРОЕКТ»,

<sup>1</sup>ОАО «Опытное конструкторское бюро машиностроения  
им. И. И. Африкантова»

Проекты энергоблоков АЭС наряду с обоснованием безопасности должны проходить процедуру верификации – проверки проекта и его отдельных частей на моделях и экспериментальных данных, что соответствует рекомендациям МАГАТЭ. В актуальной ревизии Европейских требований (EUR(D)) проект АЭС должен сопровождаться «инженерным симулятором» и/или моделирующим комплексом, который помимо верификации проектных решений должен использоваться как средство поддержки эксплуатирующей организации.

Эффективным инструментом для решения указанных задач может быть многоуровневая система математических моделей элементов АЭС, одним из элементов которой должен быть программно-технический комплекс (ПТК), позволяющий создать интегральную математическую модель энергоблока.

В рамках ФЦП «Развитие суперкомпьютеров и грид-технологий» за 2010–2012 гг. была реализована пилотная версия Виртуального энергоблока (ВЭБ) ЛАЭС-2, а программно-технический комплекс «Виртуальный энергоблок АЭС» (ПТК «ВЭБ») получил новый импульс к развитию и применению для АЭС с ВВЭР в части проверки проектных решений (рис. 1).

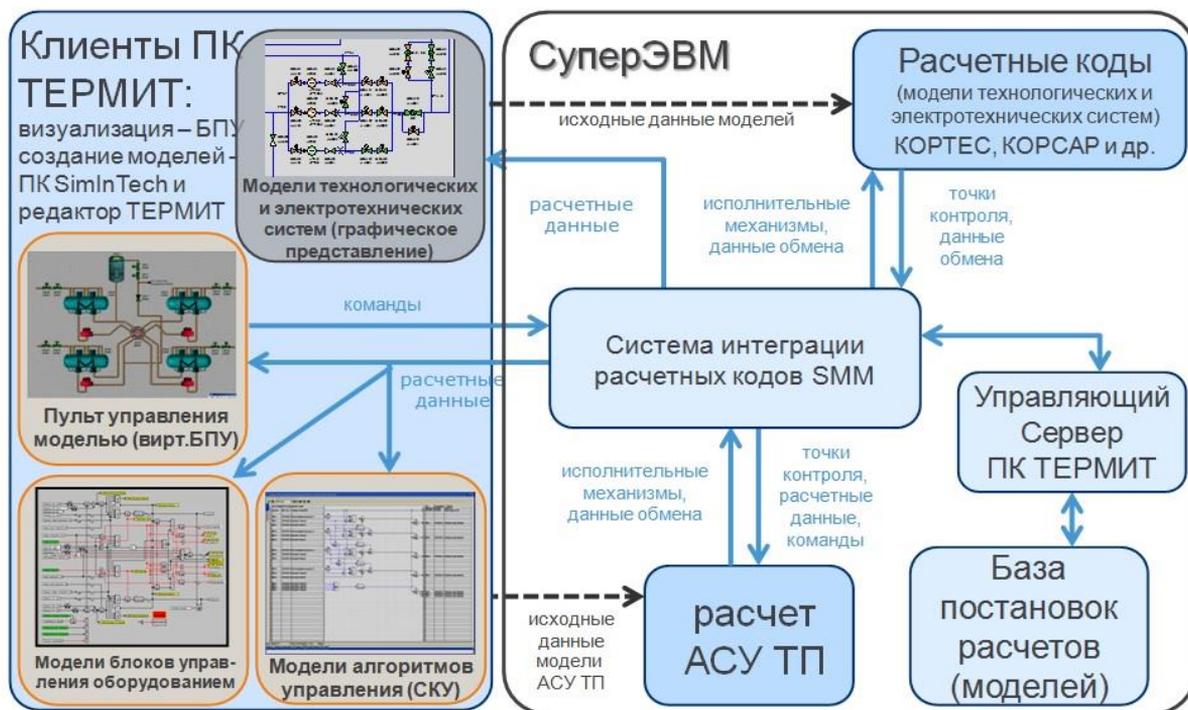


Рис. 1. Структурная схема ПТК «ВЭБ» АЭС

ПТК «ВЭБ» представляет собой набор расчетных кодов, объединенных в единый комплекс с программными оболочками, обеспечивающими связанное выполнение расчета и графический интерфейс ввода вывода, а также аппаратные средства, необходимые для эмуляции пульта. В качестве управляющего программного комплекса используются ПК SimInTech (ЗВ Сервис) и ПК ТЕРМИТ (НИТИ), для взаимодействия кодов на суперЭВМ используется ПК SMM (РФЯЦ ВНИИЭФ) [1]. Для расчета теплогидравлики в комплекс включены расчетные коды ТРР, КОРСАР [2] и КОРТЕС. На рис. 2 представлена схема организации расчета на суперЭВМ с использованием перечисленных программных средств.

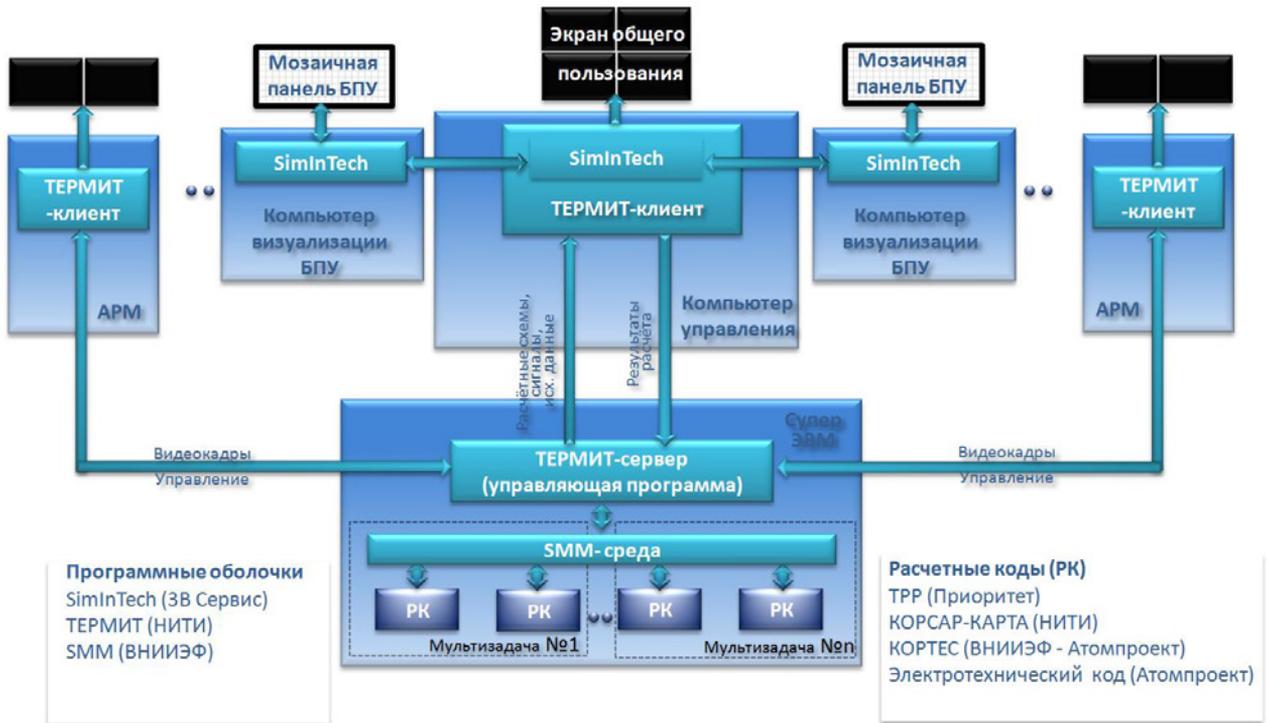


Рис. 2. Организация расчета на ПТК «ВЭБ» на суперЭВМ

Виртуальный пульт оператора моделирует работу реального БПУ АЭС и позволяет управлять расчетом (рис. 3). Для возможности гибкого изменения конфигурации БПУ состоит из 5- и 2-х мониторных рабочих мест операторов, 6 стоек мозаичных панелей с LCD интерактивными дисплеями, поддерживающими сенсорную технологию «мультитач», и экрана коллективного пользования, реализованного на 4-х LCD дисплеях диагональю 47".

ПТК ВЭБ АЭС позволяет решать следующие задачи:

- Проведение комплексной верификации проекта энергоблока АЭС.
- Моделирование режимов работы энергоблока для:
  - подтверждения технических и технологических решений;
  - отработки алгоритмов управления оборудованием и системами АЭС;
  - проверки эксплуатационных пределов энергоблока.
- Моделирование сложных комплексных сценариев развития аварийных ситуаций.
- Поддержка пуско-наладочных работ.
- Проверка функций оператора на виртуальном блочном пульте управления.

ВЭБ АЭС-2006 прошел стадию разработки и первичной апробации на базе ВЭБ ЛАЭС-2 и используется в АО «АТОМПРОЕКТ» для валидации технических и технологических решений по системам и оборудованию энергоблока, а также для отработки алгоритмов управления оборудованием и системами ЛАЭС-2, Белорусской АЭС и других АЭС.

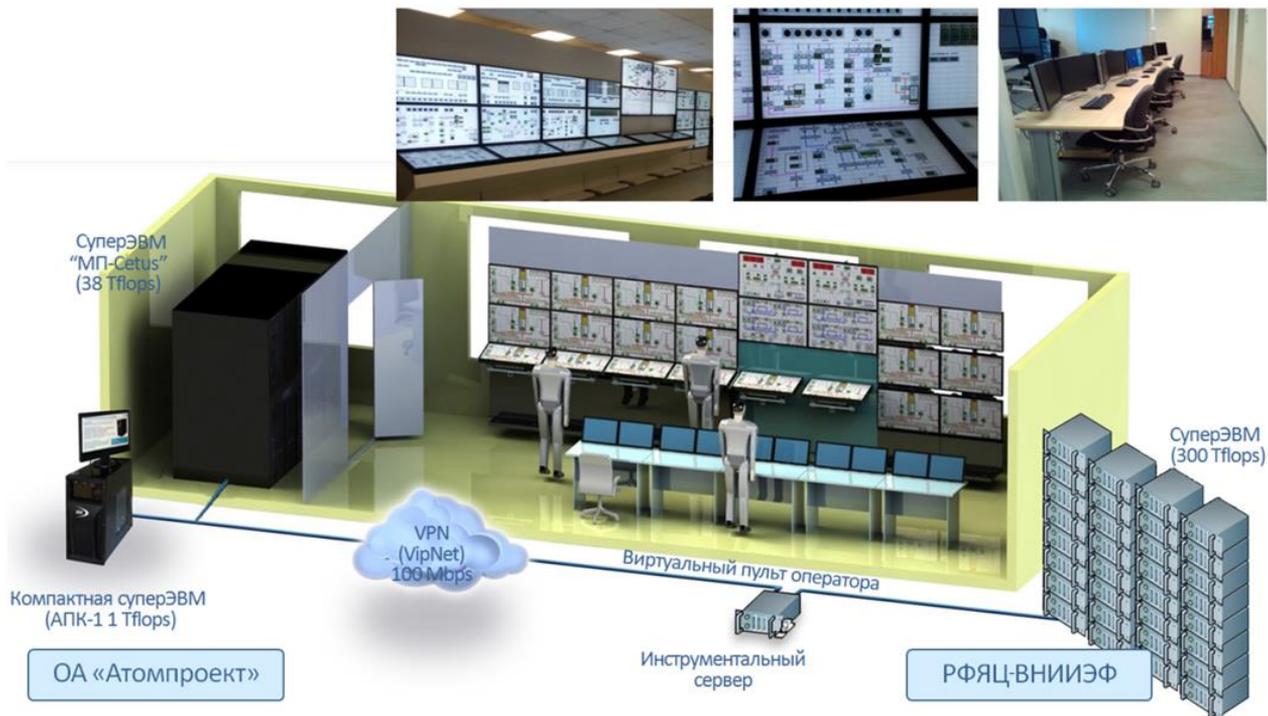


Рис. 3. Виртуальный блочный пульт управления и аппаратные средства ПТК «ВЭБ»

ВЭБ ЛАЭС-2 продолжает развиваться по пути увеличения включаемых в его состав моделей систем АЭС и их детализации, а ПТК «ВЭБ» по пути совершенствования расчетных кодов. Такое развитие модели ведет к существенному увеличению потребностей в высокопроизводительных вычислительных ресурсах и как следствие к применению технологий параллельных вычислений и оптимизации расчетных кодов. В настоящее время функционал комплекса расширен за счет включения в него кода улучшенной оценки КОРТЕС (РФЯЦ ВНИИЭФ и ВНИПИЭТ) и расчетного кода РАСНАР-БН (ОКБМ). Ведутся работы по распараллеливанию кода КОРТЕС и модернизации ПС SMM. Таким образом, можно выделить следующие основные направления дальнейшего развития ПТК «ВЭБ»:

- совершенствование функционала;
- подготовка коробочной версии;
- верификация кодов;
- расширение перечня описываемых процессов;
- интеграция с проектными данными.

В соответствии с ФЦП «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010–2015 гг. и на перспективу до 2020 г.» предусматривается дальнейшее развитие БН-реакторов в России. В качестве быстрого реактора четвертого поколения с натриевым теплоносителем планируется разработка проекта перспективного реактора БН-1200 с установленной электрической мощностью 1200 МВт.

В ходе выполнения работ по созданию технического проекта энергоблока принято решение о разработке математической модели АЭС с реакторной установкой БН-1200 на средствах ПТК «ВЭБ». В качестве исполнителей проекта были выбраны основные проектировщики – АО «АТОМПРОЕКТ» и ОАО «ОКБМ Африкантов». Сферы ответственности по разработке ВЭБ БН-1200 были разделены следующим образом:

ОАО «ОКБМ Африкантов»:

- Разработка моделей РУ и ПГ с СКУ.

АО «АТОМПРОЕКТ»:

- Разработка моделей третьего контура с СКУ.
- Разработка мозаичных панелей и видеокадров.
- Интеграция всех моделей в единую модель и ее отладка.

В 2013 году с учетом опыта ВЭБ АЭС с ВВЭР, была разработана пилотная версия модели ВЭБ АЭС с реакторной установкой БН-1200. Смоделированы основные системы АЭС – реакторная установка, паротурбинная установка, базовые элементы систем контроля и управления, виртуального блочного пульта управления.

Главной особенностью данной работы является создание ВЭБ на этапе разработки технического проекта, что позволяет проводить проверку эффективности принимаемых технических и технологических решений по основным и вспомогательным системам, оптимизацию алгоритмов управления оборудованием и системами в различных режимах работы энергоблока.

В настоящее время идет детализация моделей реакторной (рис. 4) и паротурбинной установок с вспомогательным оборудованием (рис. 5), а также расширение моделирования СКУ. В дальнейшем планируется увеличить объем ВЭБ АЭС с БН-1200 до 60 основных, вспомогательных и электротехнических систем АЭС. Для разработки теплогидравлических моделей третьего контура будет использоваться код улучшенной оценки КОРТЕС, расчет электротехнических систем будет проводиться в фазных координатах на коде РЭЛЕКС.

Внедрение разрабатываемой модели ВЭБ БН-1200 в работы по проектированию и строительству АЭС позволит не только проводить физико-математическое обоснование элементов и подсистем энергоблока с использованием современных высокоточных кодов, но и дает возможность провести комплексную верификацию проекта энергоблока АЭС, в частности, блока № 5 Белоярской АЭС. Проведение комплексного моделирования проекта соответствует рекомендациям МАГАТЭ и позволяет:

– повысить уровень безопасности объектов атомной энергетики за счет моделирования и последующего обоснования безопасности в тех режимах и условиях, которые не могут быть реализованы на действующих энергоблоках АЭС;

– поднять качество и конкурентоспособность Проекта, сократить сроки и стоимость строительства и наладки АЭС за счет повышения качества проектирования и сокращения сроков сдачи в эксплуатацию АЭС с реакторной установкой БН-1200.

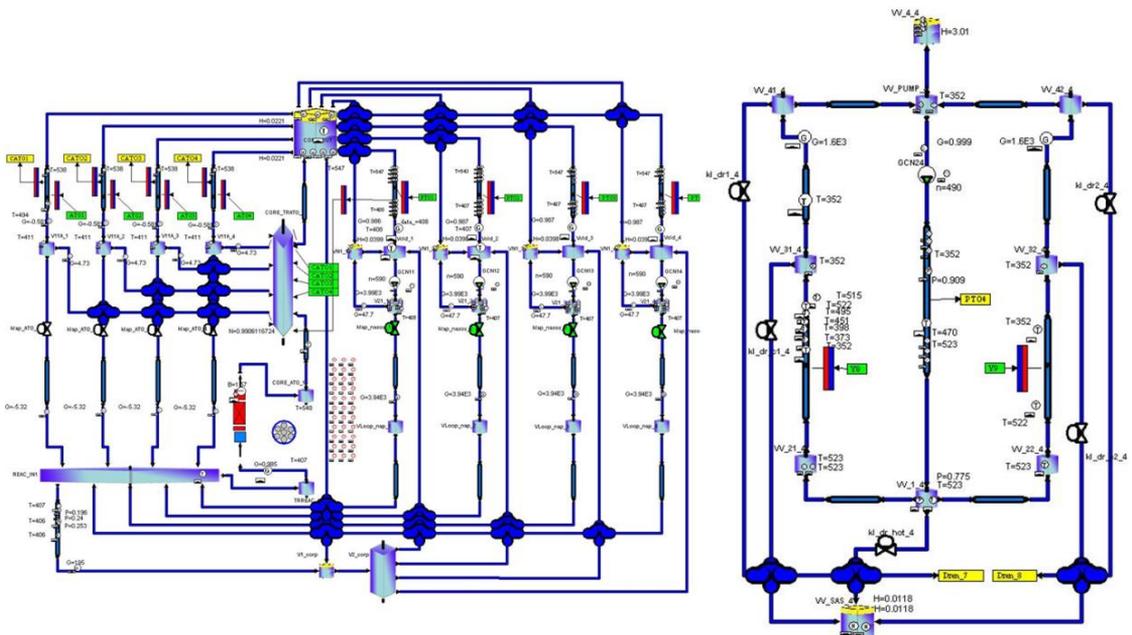


Рис. 4. Модель первого и второго (одна петля) контуров (ОАО «ОКБМ Африкантов»)

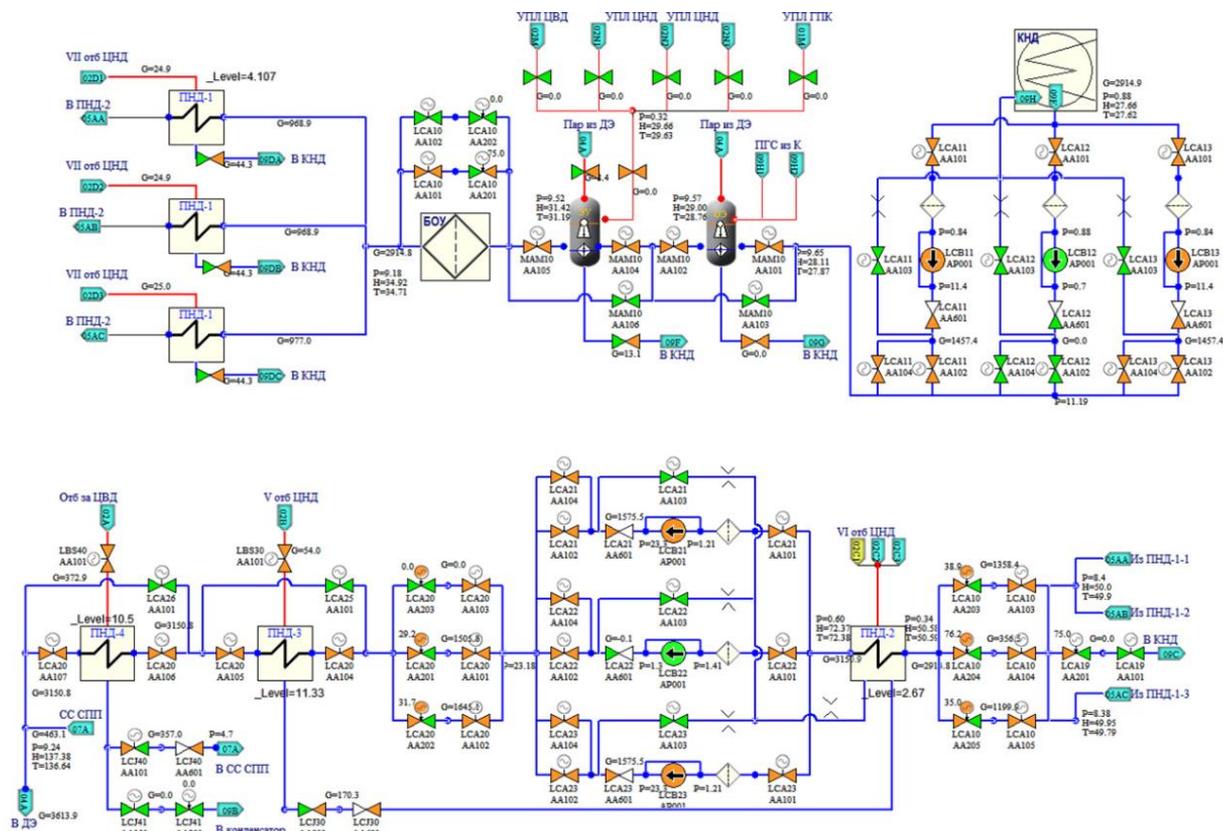


Рис. 5. Модель системы регенеративного подогрева низкого давления (АО «АТОМПРОЕКТ»)

## Литература

1. Михеев В. С., Соколов В. Г., Деулин А. А., Образцов Е. П. Интеграция программных средств в ПТК «Виртуальный энергоблок АЭС с ВВЭР» // Труды XIV Междунар. конф. «Супервычисления и математическое моделирование» / под ред. Р.М. Шагалиева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. С. 128.
2. Драгунов Ю. Г., Быков М. А., Василенко В. А., Мигров Ю. А. Опыт применения и развития расчетного кода КОРСАР для обоснования безопасности АЭС с ВВЭР // Теплоэнергетика. 2006. № 1. С. 43–47.

## ЗОННЫЙ RANS-LES ПОДХОД НА ОСНОВЕ АЛГЕБРАИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕЙНОЛЬДСОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

*А. С. Козелков, В. В. Курулин, О. Л. Пучкова*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

## Введение

Наиболее применимыми при решении промышленных задач являются RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) модели турбулентности [1, 2], которые характеризуются устойчивым итерацион-