

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА ПРИМЕРЕ ПК «Радуга-ЭУ»

О.Ю. КАВУН (МГТУ им. Баумана),
А.М. ЛИФШИЦ (ООО «НПЦ Приоритет»)



ПК «Радуга-ЭУ» – Платформа для разработки моделей. Дано краткое описание Программного Комплекса «Радуга-ЭУ», разработанного ООО «НПЦ Приоритет» для динамического моделирования тепловых и атомных электростанций. Комплекс состоит из модулей, позволяющих создавать модели реакторных установок, турбоустановок, основного и вспомогательного котельного оборудования, АСУ ТП энергоблока. Комплекс прошел верификационные испытания и применяется Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) для оценки обеспечения безопасности АЭС.

Ключевые слова: ВВЭР – водо-водяной корпусной энергетический ядерный реактор; ВПБЭР – водяной повышенной безопасности энергетический реактор; АСТ – атомная станция теплоснабжения; АСПТ – атомная станция промышленного теплоснабжения; СРК – стопорно-регулирующий клапан турбоустановки; БРУ-К – быстродействующая редуцирующая установка.

Во всех развитых странах и во всех отраслях интенсивно ведутся различные работы по цифровизации предприятий, в том числе осуществляются разработки «цифровых двойников».

В силу того, что цифровизация является ещё довольно молодым явлением, термин «цифровой двойник» многие понимают по-разному. Мы будем понимать под «цифровым двойником» виртуальную копию объекта, обладающую достаточной точностью и функционалом, позволяющую принимать те или иные решения. По сути, это набор компьютерных программ, геометрических и тепло-гидравлических исходных данных, описывающих сам объект и протекающие в нем процессы с требуемым уровнем детализации. Цифровой двойник обладает ключевыми характеристиками моделируемого объекта и способен воспроизводить его состояния при разных условиях.

Цифровые двойники и моделирующие компьютерные программы различны, но они дополняют друг друга. Цифровой двойник использует моделирование не только для получения информации о том, как продукт будет работать в физическом мире в самых разных условиях,

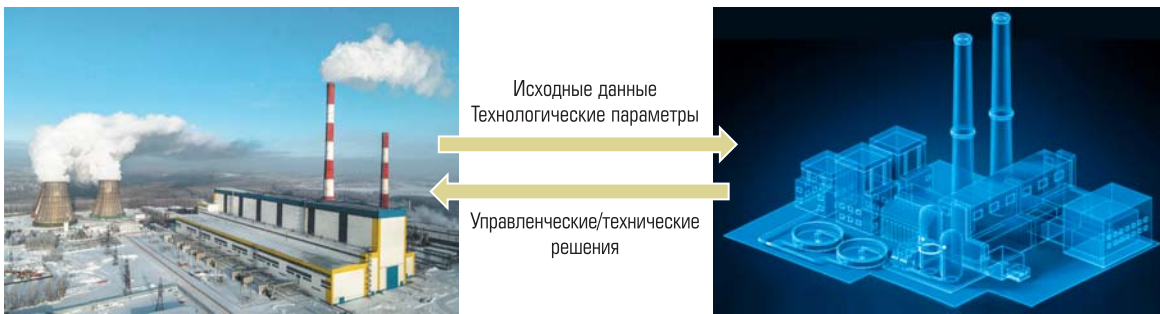
но также и о том, как эти характеристики будут меняться на протяжении всего срока службы.

Моделирование можно выполнять на цифровых двойниках уже существующих продуктов. Тем не менее, моделирование может быть выполнено на разрабатываемых продуктах, чтобы подтвердить, что новый продукт будет соответствовать требованиям после того, как он будет физически изготовлен.

Основная цель применения «цифровых двойников» – поиск и обоснование решений, повышающих экономическую эффективность предприятия. С их помощью решаются многие сложные задачи:

- выбор оптимальных режимов работы оборудования и организация технологических процессов (экономия ресурсов);
- оценка текущего состояния и прогнозирование степени износа оборудования (оптимизация ремонта и замены оборудования);
- моделирование аварийных режимов для оценки обоснования безопасности объекта (поведение системы при отказах оборудования).

Всё это позволяет экономить ресурсы (финансовые, материальные, временные) и повышает экономическую эффективность.



▲ Рис. 1. Компоненты цифрового двойника

Цифровой двойник – виртуальная копия (модель) объекта или процесса, выполненная с достаточной точностью и функционалом, чтобы с ее помощью можно было принимать решения

Цифровой двойник для управления жизненным циклом продукта состоит из трех основных компонентов (рис. 1):

- Физический продукт в физической среде.
- Виртуальный продукт в виртуальной среде (отражающей физическую среду).
- Связь между физическим и виртуальным мирами, которая передает данные в виртуальный продукт, а также информацию и данные из виртуального продукта и среды в физический мир.

В начале жизненного цикла объекта, когда физический объект еще не существует, прототип цифрового двойника используется при проектировании для проверки поведения и функциональных характеристик проектируемого объекта.

Одной из стратегических задач при создании Цифровых двойников является использование на внутренних и внешних рынках отечественных разработок.

Так сложилось, что в разработке и применении цифровых моделей энергоблоков электростанций наиболее значительно продвинулись в Концерне Росэнергоатом. Накопленный в Росэнергоатоме опыт применения моделирования позволяет предлагать проверенные методики и разработанные на их основе программные комплексы. Одним из таких комплексов, прошедших верификацию и аттестацию в Ростехнадзоре (Госатомнадзоре), является ПК “РАДУГА-ЭУ”, в состав которого входят все необходимые средства для создания моделей энергоблоков тепловых, атомных и гидроэлектростанций.

НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПК “РАДУГА-ЭУ”

ПК “РАДУГА-ЭУ” [1] предназначен для полномасштабного моделирования динамики энергоблока, а также при выборе, обосновании и оптимизации схемно-конструкторских решений и алгоритмов управления.

Основными составными частями его являются модули:

- программный комплекс “RAINBOW-TRP”, реализующий связанную нейтронно-физическую и теплогидравлическую модель активной зоны реактора, предназначен для расчета динамики реакторной установки, расчета состояния активной зоны РУ при выгорании (расчет топливной кампании) и перегрузок топлива;
- программный комплекс “TRP” предназначен для моделирования переходных процессов в оборудовании тепловых и атомных станциях, а также для моделирования динамики турбоустановок;
- программный комплекс “Моделирование в технических устройствах” (“МВТУ”) предназначен для моделирования АСУ ТП энергоблока;
- программа “Integr” предназначена для организации информационного обмена между расчетными модулями.

ПК “Rainbow-TRP” и “TRP” по команде из ПК “МВТУ” моделируют работу всех активных исполнительных механизмов: приводов СУЗ, насосов, задвижек, клапанов и т.д.

Системой обмена информацией предусмотрен вывод практически всех вычисляемых в программе расчетных параметров, в том числе и тех, которые не регистрируются при современном уровне развития измерительной техники.

Из программных комплексов “RAINBOW-TRP” и “TRP” в файлы обмена данными с ПК “МВТУ” передаются расчетные параметры: нейтронные потоки; температуры топлива, теплоносителя, стенок трубопроводов; распределение давления в элементах РУ и турбоустановки, мощность электрогенератора и др., где преобразуются в показания датчиков.

Расчет процессов в реальном масштабе времени обеспечивается за счет размещения собственно моделирующих программ (“RAINBOW-TRP”, “TRP” и “MBTU”) на многопроцессорной рабочей станции.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МОДУЛЕЙ ПК “РАДУГА-ЭУ” (ПК “Rainbow-TRP”, ПК “TRP” и ПК “MBTU”)

Программный комплекс “RAINBOW-TRP” предназначен для расчета динамики реакторной установки, расчета состояния активной зоны РУ при выгорании (расчет топливной кампании) и перегрузок топлива. Активная зона РУ моделируется в трехмерном двухгрупповом диффузионном покассетном приближении с 7-ю расчетными точками на кассету. Число групп запаздывающих нейтронов определяется пользователем и может составлять до 31 группы включительно. Система уравнений переноса нейтронов решается на гексагональной в плане расчетной сетке методом конечных разностей с использованием метода разрывных коэффициентов (метод “изображений”). При моделировании полей энерговыделения учитываются трехмерные поля источников остаточных энерговыделений (источников тепла в результате распада продуктов реакций деления ядерного топлива, до 31 группы включительно), что позволяет использовать стандарт ANSI по расчету остаточных энерговыделений. Поля энерговыделения рассчитываются путем определения среднего числа делений в поперечном сечении ТВС.

При расчете поглощения нейтронов используется трехмерная нестационарная модель распределения Xe, Sm и их ядер-предшественников. Кроме того, ПК “RAINBOW-TRP” производит расчет коэффициентов реактивности и других параметров точечной кинетики.

ПК “RAINBOW-TRP” моделирует поддержание заданного закона изменения нейтронной мощности, движение отдельных органов СУЗ, групп стержней СУЗ, пассивную и активную систему ввода поглотителя, несимметричную подачу борированной, чистой, холодной и горячей воды в первый контур, несимметричное захолаживание петель. Программный комплекс позволяет получать информацию о пространственном перераспределении поля энерговыделения во время этих переходных режимов.

ПК позволяет моделировать режимы с нарушением нормальных условий эксплуатации

и аварийные режимы реакторной установки без разгерметизации первого контура.

Теплогидравлическая модель первого контура реакторной установки позволяет моделировать гидродинамические процессы в реакторных установках типа ВВЭР-1000, ВВЭР-440, ВВЭР-640, ВПБЭР-600, АСТ-500, АСТ-200, АСПТ и ряда других. Допускается моделирование как однофазного, так и двухфазного течения теплоносителя в каналах активной зоны

Комплекс учитывает работу технологических систем первого и второго контура, в том числе гидроемкостей, предохранительных клапанов и т.д.

Первая стабильная версия ПК “RAINBOW-TRP” была аттестована как программа “РАДУГА” (название переведено на русский язык) в 1996 г. [2].

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС “TRP”

Программный комплекс “TRP” (Thermal Power Plant) [3] предназначен для моделирования переходных процессов в оборудовании тепловых, гидро и атомных электростанциях.

Расчетная схема энергоблока включает:

- расчетную схему турбины, конденсаторов, насосов и оборудования конденсатного тракта, включая подогреватели низкого давления, запорно-регулирующую арматуру, трубопроводы и т.д., деаэратора, электропитательных и турбопитательных насосов, подогревателей высокого давления, паро-водяной части парового котла (включая тракт промперегревателя), СРК и БРУ-К;
- расчетную схему котла, включая модели газового тракта котла, дутьевого вентилятора, дымососа, воздухо и газопроводов, дымовой трубы, запорной и регулирующей арматуры.

В программном комплексе “TRP” численно решается система дифференциальных уравнений теплогидродинамики и теплообмена в приближении односкоростного течения несжимаемой жидкости в пределах теплогидравлических каналов. Оборудование, имеющее разделение фаз типа компенсационных баков, парогенераторов или конденсаторов турбин моделируется путем решения уравнений термодинамики в приближении трех объемов с учетом сепарации пара и воды с определением давления в указанном оборудовании.

Расчетная схема моделируемой тепло-гидравлической системы набирается из следующих основных расчетных элементов:

- каналов (трубопроводы, проточная часть теплообменников т.д.). Для каналов решаются уравнения движения в приближении односкоростного течения несжимаемого теплоносителя;
- узлов (тройники, штуцеры, фланцы и т.д.). При решении уравнений гидродинамики в узлах рассчитывается величина давления;
- компенсационных объемов (оборудование, в котором имеет место разделение фаз – баки, компенсаторы объема, конденсаторы турбин, парогенераторы и т.д.). В компенсационных объемах решаются уравнения состояния.

Программа позволяет моделировать тепловые сети произвольной конфигурации, использующие в качестве теплоносителя воду или другие гомогенные теплоносители: жидкости (включая жидкие металлы) и газы (помимо воды могут одновременно моделироваться до 20-ти гомогенных не смешивающихся между собой и водой теплоносителей). При этом предусмотрено моделирование тепло-гидравлических процессов в трубопроводах, прямооточных теплообменниках, конденсационных теплообменниках, парогенераторах и барабан-сепараторах АЭС, конденсаторах, деаэраторах и т.п., а также в паровых котлах, маслосистемах, другом оборудовании электростанций.

Система дифференциальных уравнений гомогенной равновесной несжимаемой модели потока при численном решении аппроксимируется системой конечно-разностных уравнений.

Система уравнений движения решается полуявным методом в предположении адиабатической несжимаемости теплоносителя. Уравнения энергии, а также уравнения теплопроводности – балансным методом.

В каналах учитывается изменение плотности теплоносителя, связанное с неравновесным кипением.

В программе предусмотрено моделирование так называемых активных элементов, когда течение в пределах элемента не является изохорным (ступень турбины, насос и т.п.).

Возможно моделирование динамических процессов во вращающихся механических устройствах, входящих в набираемую расчетную схему, с учетом инерционных характе-

ристик их роторов (турбины с нагрузкой на электрогенераторы, насосы с электроприводом, насосы с турбоприводом, комбинация всех перечисленных устройств на одном валу). Для определения частоты вращения ротора решается нестационарное уравнение сохранения момента инерции.

Для расчета оборудования, в котором имеется разделение фаз теплоносителя – решаются уравнения равновесной термодинамики. В паровом пространстве может присутствовать неконденсирующийся газ. В расчетных элементах возможность разделения фаз теплоносителя с образованием гидравлических затворов, а также накопление пара в сборной камере реактора.

ПК “ТРР” зарегистрирован в реестре отечественного ПО. Номер регистрации: 2001610744 и аттестован Ростехнадзором в 2018 году [4].

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС “МОДЕЛИРОВАНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ” (МВТУ)

Программный комплекс “МВТУ” [5] является средой разработки и функционирования модели АСУ ТП энергоблока АЭС, ТЭС, ГЭС.

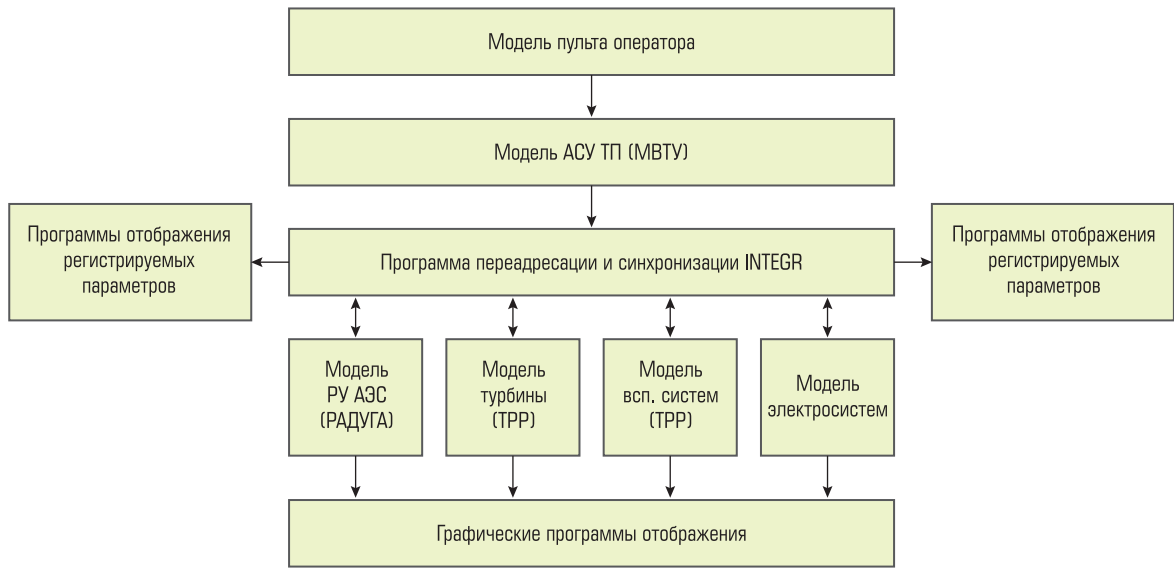
В состав программного обеспечения комплекса входят:

- графический редактор структурных схем;
- библиотека моделей элементов;
- средства связи и обмена данными с внешними устройствами;
- средства создания мнемосхем и панелей управления;
- средства отладки схем и диагностики ошибок на этапах редактирования и моделирования;
- help-система.

Графический редактор комплекса позволяет формировать математическую модель системы управления в виде функциональной схемы, состоящей из блоков и линий связи между ними. При этом блоки описываются в виде входо-выходных отношений. В ПК реализована технология, обеспечивающая создание и анализ структурных схем большой размерности.

Библиотека моделей содержит более 200-т надежно функционирующих блоков. В ПК реализованы следующие режимы работы:

- моделирование во временной области;
- параметрическая оптимизация;
- частотный и корневой синтез.



▲ Рис. 2. Блок-схема программного комплекса “РАДУГА-ЭУ”

Кроме того, программный комплекс позволяет создавать и подключать к модели АСУ ТП графические средства отображения информации и управления моделью в режиме “on-line” (пульты оператора, мнемосхемы, внесение от-казов и т.д.).

ПРОГРАММА “INTEGR”

Функциональное назначение данного модуля — организация информационного обмена, в том числе:

- 1) синхронизация вычислительного процесса;
- 2) прием потоков информации от расчетных программ;
- 3) прием потоков информации от АСУ;
- 4) сортировка потоков информации по каналам обмена;
- 5) пересылка управляющей информации в расчетные программы;
- 6) пересылка показаний датчиков и команд оператора в модель АСУ ТП;
- 7) пересылка визуально контролируемой информации в программы отображения.

Программа “Integr” устанавливает связь с программами “RAINBOW-TRP”, “МВТУ”, “TRP” через систему файлового обмена.

СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

При функционировании ПК “РАДУГА-ЭУ” происходит динамический обмен данными между входящими в его состав расчетными

программами. Блок-схема программного комплекса “РАДУГА-ЭУ” представлена на рис. 2. Обмен данными осуществляется с использованием файлов в среде Windows. Для этого каждая расчетная программа формирует 4 файла обмена: два файла с описанием списков входных и выходных параметров и 2 файла обмена параметрами.

Существует два способа подключения расчетных задач: синхронный и асинхронный способ передачи информации. Программа “INTEGR” последовательно опрашивает все подключенные к ней программы, определяет текущее модельное время каждой из моделирующих программ, сверяет его с таймером процессора (если заказан режим моделирования в реальном времени), останавливает программы, время которых превысило текущее моделируемое время, и после достижения всеми программами модельного времени, отдает команду на переход к расчету следующего временного такта. Асинхронные задачи обмениваются данными без проверки времени счета и используются в основном для отображения моделируемых процессов.

Одновременно в моделирующий комплекс могут подключаться произвольное число перечисленных выше программ, в том числе и несколько программ “INTEGR”. Такая необходимость может возникнуть при моделировании АЭС, состоящей из нескольких энергоблоков. В этом случае предусмотрена ветвящаяся структура комплекса.

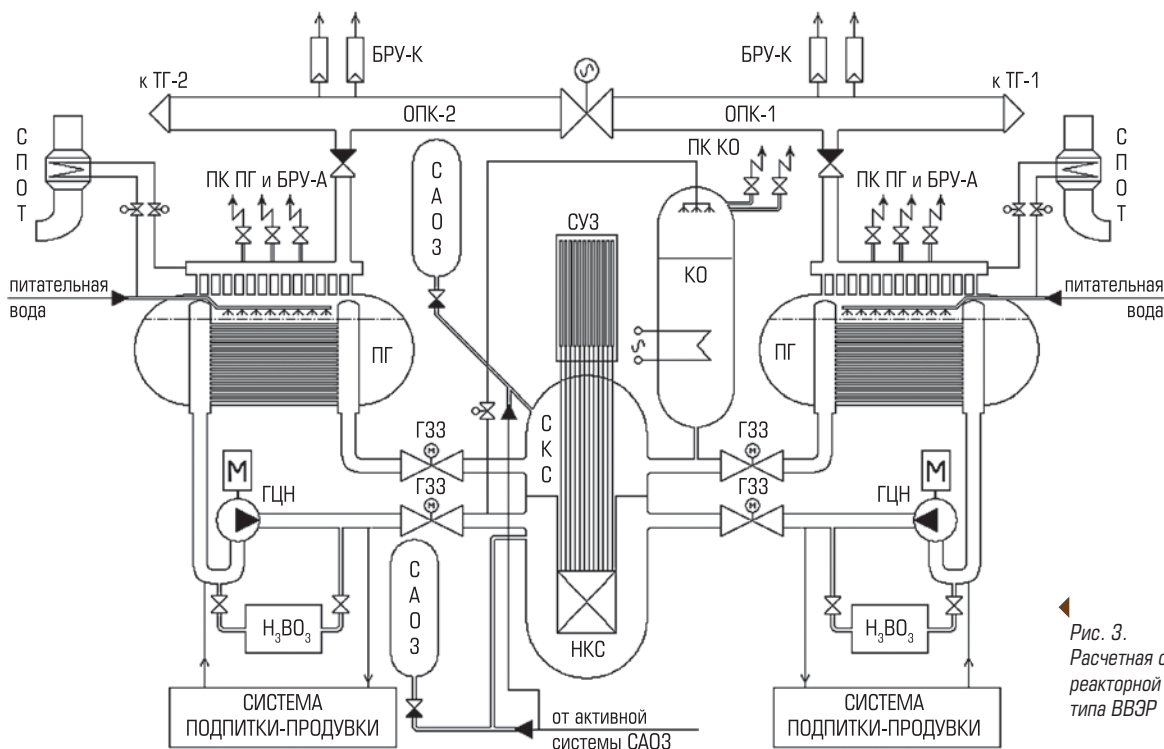


Рис. 3. Расчетная схема реакторной установки типа ВВЭР

ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНЫХ СХЕМ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Расчетная схема реакторной установки (рис. 3)

Для моделирования работы энергоблока АЭС были смоделированы основные технологические системы:

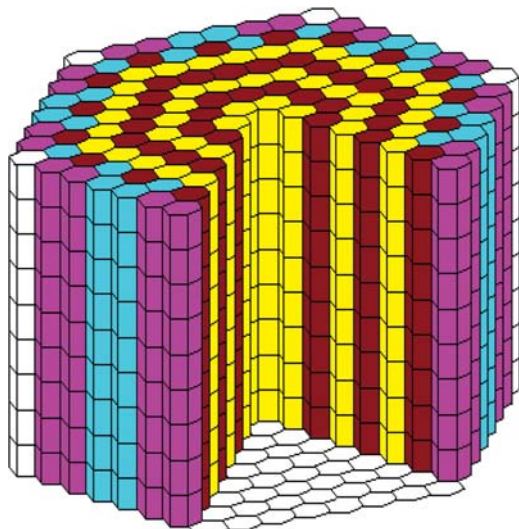
- реакторная установка, включая систему парогенераторов, компенсатора давления и главных циркуляционных насосов;
- система водообмена первого контура;
- системы второго контура;
- АСУ ТП первого и второго контура.

В расчетную модель первого контура входят: активная зона, общий тяговый участок, циркуляционные петли. Предусмотрена возможность моделирования неполного перемешивания теплоносителя в сборной и напорной камерах смешения.

Расчетная схема активной зоны

Активная зона реакторной установки моделируется системой шестигранных параллельных каналов, расположенных в соответствии со схемой загрузки активной зоны (рис. 4).

Максимальное число каналов активной зоны может равняться 2791 при числе узлов



- фиктивная кассета
- кассета с обогащением 1,6%
- кассета с обогащением 3,0%
- кассета с обогащением 4,4%
- кассета с обогащением 4,4% и профилированием

Рис. 4. Активная зона реакторной установки моделируется системой шестигранных параллельных каналов, расположенных в соответствии со схемой загрузки активной зоны

по высоте зоны 25 (общее число расчетных узлов – 70 000). Для расчета полей энерговыделения в активной зоне реактора используется уравнение нейтронной кинетики в трехмерном двухгрупповом диффузионном приближении.

**ОПИСАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ
МОДЕЛИРУЮЩЕГО КОМПЛЕКСА
ПРОГРАММ РАДУГА-ЭУ
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ЭНЕРГОБЛОКА ТЭС**

Модель теплогидравлической схемы любой энергоустановки набирается из стандартных блоков: канал, узел, компенсационный объём, регулятор, ротор (турбина и насос), затем задаются связи между блоками и граничные условия.

Модель энергоблока мощностью 500 МВт состоит из модели турбинного отделения, модели парового и газового тракта парового котла, системы АСУ ТП энергоблока и виртуальных пультов управления энергоблоком в интерактивном режиме.

- Расчетная схема энергоблока включает:
- расчетную схему турбины, конденсаторов, насосов и оборудования конденсатного тракта, включая подогреватели низкого

давления, запорно-регулирующую арматуру, трубопроводы и т.д., деаэрата, одного электропитательного и двух турбопитательных насосов, подогревателей высокого давления, паро-водяной части парового котла (включая тракт промперегревателя), СРК и БРУ-К;

- расчетную схему котла, включая модели газового тракта котла, дутьевого вентилятора, дымососа, воздухо и газопроводов, дымовой трубы, запорной и регулирующей арматуры;
- модель АСУ ТП энергоблока, набранную в соответствии с проектом;
- модель пультов интерактивного управления.

Созданная компьютерная модель энергоблока позволяет в интерактивном режиме моделировать следующие режимы:

- пуск из холодного состояния и остановка энергоблока;
- маневрирование мощностью в ручном и в автоматическом режимах;
- моделирование отказов оборудования и отказов АСУ ТП энергоблока.

Применение Программного Комплекса “РАДУГА-ЭУ” для разработки математических моделей энергетического оборудования генерирующих компаний представлено в табл. 1.

Таблица 1. Применение Программного Комплекса “РАДУГА-ЭУ” для разработки математических моделей энергетического оборудования генерирующих компаний

Объекты	Заказчик	Период	
Проектирование энергоблоков АЭС	АЭП	2010-2016	Моделирование проектных решений при проектировании АСУ ТП. Моделирование оборудования АЭС
ТЭЦ-21	Мосэнерго	1997	Т-100-130-3
Модель энергоблока мощностью 500 МВт с турбиной К-500 на сверхкритических параметрах и паровым котлом Пп-3250-255	Мосэнерго	2005	К-500
	АЭП	1997	К-1000
ТЭЦ-26 Мосэнерго ЧРП ПЭН-2	ВНИИЭ	1998	ПЭН 1-3
ТЭЦ-26 Мосэнерго ЧРП ПЭН-1,2	ИЦ ЭНЭЛ	1999	ПЭН 1-2
ЧРП 4-х сетевых насосов	ИЦ ЭНЭЛ	1999	Сетевые насосы ТЭЦ-25 Мосэнерго
ЧРП ПЭН 1-3	ИЦ ЭНЭЛ	2000	ПЭН 1-3 Камчатской ТЭЦ-2
Модель энергоблока мощностью 1000 МВт	АЭП	2000	К-1000 ЛМЗ
ТЭЦ-8 Мосэнерго ЧРП от 1 до 4 насосов типа СЭ 2500-180	ВНИИЭ	2001	Сетевые насосы
ТЭЦ-25 ЧРП насосов 1-4	ИЦ ЭНЭЛ	2002	Насосы подпитки тепловых сетей
	ВТИ, АЭП	2003	Р-50-130-1 ЛМЗ

Продолжение таблицы 1. Применение Программного Комплекса “РАДУГА-ЭУ” для разработки математических моделей энергетического оборудования генерирующих компаний

Объекты	Заказчик	Период	
Район № 5 тепловых сетей Мосэнерго	ЭЦН	2004	ЧРП двух перекачивающих насосов
Волгодонская (Ростовская) АЭС	АЭП	2004	Энергоблок 1000 МВт
ТЭЦ-26 Мосэнерго ЧРП ПЭН-1-3	ВНИИЭ	2005	Тракт питательной воды, котлы 1,2
Расчеты теплогидравлических систем при моделировании оборудования АЭС	АЭП	с 2006	ПК ТРР (для АЭП в Москве)
АЭС Бушер (Исламская Республика Иран)	АЭП	1997-2006	Энергоблок АЭС 1000 МВт
АЭС Куданкулам (Республика Индия)	АЭП	2004	Энергоблок АЭС 1000 МВт
АЭС Козлодуй (Республика Болгария)	АЭП	2002	Реакторное отделение энергоблока АЭС
Система экспресс-оценки и прогноза развития аварии на Российских энергоблоках АЭС с РУ ВВЭР, РБМК и БН для ИАЦ Ростехнадзора	ФБУ “НТЦ ЯРБ” России и Белоруссии	с 2005	Модели всех энергоблоков АЭС России
АЭС с ВВЭР-1200	Атомпроект	2020	Модель энергоблока АЭС
Проект “Прорыв”	Внутренний заказ	2020	АСУ ТП для проекта “Брест-300”
Проект СВБР	Внутренний заказ	2020	Турбоустановка, АСУ ТП и вспомогательные системы
Моделирование гидротехнических сооружений и ГЭС	Внутренний заказ	2014	Моделирование динамики ГЭС и паводков

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мировой рынок Цифровых Двойников с точки зрения выручки оценивался в 6,9 млрд долларов США в 2022 году и готов достичь 73,5 млрд долларов США к 2027 году. Среднегодовой темп роста составит 60,6% с 2022 по 2027 год. Российская наука способна не отставать от современных исследований и разработок в области создания Цифровых Двойников. Ряд крупных отечественных компаний уже создали Центры Компетенций, которые способны развивать научные направления для перехода к цифровой экономике, неотъемлемой частью которой является создание цифровых моделей и цифровых двойников.

Список литературы

1. *Кавун О.Ю.* Методика моделирования динамики энергоблока АЭС, реализованная в программном комплексе

“РАДУГА-ЭУ” // ВАНТ. сер.: Физика ядерных реакторов. М.: 1999, вып. 2.
 2. *Аттестационный паспорт* программного средства “Радуга” № 62 от 17 октября 1996 г.
 3. *Кавун О.Ю., Куно М.Я., Фейман В.Г.* Программа “ТРР” для теплогидравлического расчета сложных теплогидравлических сетей // Алгоритмы и программы для нейтронно-физических расчетов ядерных реакторов НЕЙТРОНИКА-97: Сб. трудов семинара МАЭ РФ. Обнинск. 1998, с. 111-118.
 4. *Аттестационный паспорт* программного средства “ТРР версия 6” № 445 от 24 октября 2018 г.
 5. *Козлов О.С., Кондаков Д.Е., Скворцов Л.М., Тимофеев К.А., Ходаковский В.В.* Инструкция пользователя программным комплексом “Моделирование в технических устройствах” (ПК “МВТУ”, версия 3.5). М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2007, 187 с.

Кавун Олег Юрьевич – д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Баумана, Лифшиц Александр Михайлович – Председатель Совета директоров ООО “НПЦ Приоритет”.