

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МОДЕЛИ ИЯУ МБИР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДЫ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ SIMINTECH И РАСЧЕТНОГО КОДА PRISET

И.А. Паршиков*, Ю.А. Долгов, И.А. Ларионов**, А.М. Щекатуров***

* ООО «ЗВ Сервис». 127051, Россия, г. Москва, Трубная ул., 25 к.1

** АО «НИКИЭТ». 107140, Россия, г. Москва, М. Красносельская ул., 2/8



Анализ безопасности реакторной установки при ее проектировании требует применения не только расчетных кодов для анализа процессов разной природы, но и удобных средств разработки математических моделей технологических систем. Средства моделирования должны обеспечивать проведение многовариантных оптимизационных расчетов, позволяющих проектировщику и (или) конструктору проверять принимаемые проектные решения и уточнять конструкцию, состав и параметры работы технологических систем. Любое внесение изменений в проектно-конструкторскую документацию должно сопровождаться анализом их влияния не только на конкретную систему, но и на всю реакторную установку (РУ) в целом. Своевременную и необходимую расчетную проверку обеспечивает комплексная модель динамики.

Создана комплексная модель ИЯУ МБИР с жидкометаллическим натриевым теплоносителем с помощью среды динамического моделирования SimInTech и одномерного связанного нейтронно-физического и теплогидравлического кода PRISET. Выполненная в виде инженерного инструмента модель представляет собой программную реализацию процессов различной природы в реакторной установке и содержит математические модели всех важных для безопасности технологических систем. Проведена модернизация среды динамического моделирования SimInTech и расчетного кода PRISET. Разработанный интерфейс пользователя совместно с моделью алгоритмов обеспечивает возможность выполнения комплексных расчетов в обоснование безопасности РУ. Проведенные тестовые расчеты с получением локальных и интегральных параметров в переходных процессах подтверждают работоспособность комплексной модели ИЯУ МБИР.

Состав средств моделирования комплексной модели обеспечивает ее использование в качестве тренажера для обучения оперативного персонала, а также в виде инструмента для отработки человеко-машинного интерфейса при создании пультов оператора.

Область применения комплексной модели не ограничена ИЯУ МБИР. Она может быть применена для анализа безопасности любых исследовательских реакторов бассейнового типа, исследовательских реакторов, охлаждаемых водой под давлением, промышленных реакторных установок бассейнового типа, а также реакторов с жидкометаллическим теплоносителем.

Ключевые слова: алгоритмы систем управления, комплексная модель, конструирование, нейтронно-физические процессы, обоснование безопасности, проектирование, расчетный код PRISET, среда динамического моделирования SimInTech, реакторная установка МБИР, теплогидравлические процессы.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение высокого уровня безопасности и надежности – основополагающая задача при эксплуатации АЭС. Современный анализ происходящих на АЭС процессов сопровождается созданием математических моделей реакторных установок с применением расчетных кодов. Вопросы безопасности напрямую зависят от прогноза и исследования развития возможных исходных событий при эксплуатации реакторной установки, наличия и достаточности технических средств по контролю и управлению авариями [1 – 3].

Поведение исследуемого объекта во времени и его динамические свойства ввиду сложности происходящих явлений могут быть описаны только с помощью комплексных моделей динамики. Создание математической модели сложного технического объекта, как и его проектирование, можно отнести к одной из самых трудоемких инженерных задач, для решения которой зачастую требуется взаимосвязь нескольких трудовых коллективов – конструкторов, программистов, технологов и инженеров.

Описывается разработка и тестирование комплексной модели динамики для анализа процессов в исследовательской реакторной установке МБИР с жидкометаллическим натриевым теплоносителем. При выполнении работы создано современное средство моделирования за счет интеграции расчетного кода PRISET для анализа теплогидравлических и нейтронно-физических процессов в РУ и среды динамического моделирования SimInTech в качестве наглядного и интуитивно понятного интерфейса пользователя разработчика расчетных моделей. Помимо удобства моделирования связка с SimInTech обеспечивает возможность моделирования алгоритмов системы управления, синхронизацию расчета различных частей математической модели и управление расчетом.

РАСЧЕТНЫЙ КОД PRISET

PRISET – одномерный связанный нейтронно-физический и теплогидравлический расчетный код, предназначенный для моделирования нестационарных процессов в активных зонах ядерных реакторов и их разветвленных технологических контурах охлаждения [4]. Этот код применяют для выполнения расчетного анализа нормальных эксплуатационных режимов с учетом работы системы автоматического регулирования мощности, пусковых режимов, режимов разогрева и расхолаживания РУ, аварийных режимов, обусловленных отказами технологического оборудования, систем управления и обеспечивающих систем.

Расчетный код PRISET может быть применен для анализа и обоснования безопасности исследовательских и промышленных реакторов бассейнового типа, охлаждаемых водой под давлением или жидкометаллическим теплоносителем.

Математическая модель РУ в PRISET содержит уравнения, подробно описывающие теплогидравлические процессы в тепловыделяющем канале и элементах твэлов с учетом изменения фазового состояния теплоносителя, неравновесной теплогидродинамики и зависимости теплообмена от режима течения теплоносителя. После приведения к конечно-разностной форме дифференциальные уравнения решаются относительно неизвестных функций (давления или расхода в зависимости от исходных данных) с использованием численных методов.

Для гибкого моделирования элементов оборудования исследуемой установки

(или системы) математическая модель представлена в виде отдельных автономных модулей с необходимыми входными и выходными параметрами.

Теплогидравлическая модель состоит из веток и соединяющих их узлов. Ветки предназначены для описания элементов контура циркуляции теплоносителя – проточную часть оборудования, трубопроводы или их отдельные участки, байпасные участки и т.д. В ветках определяются значения расходов, плотности и параметров установленного в них оборудования (движущий напор насоса, температура теплоносителя, твэла и его оболочки в тепловыделяющем канале и др.). Узлы используются для учета входных и выходных коллекторов, точек подключения различного оборудования или точек соединения трубопровода при моделировании участками конечной длины. В узлах вычисляются значения давления и температуры теплоносителя.

Для расчета разветвленных гидравлических сетей решается система уравнений, описывающая закон сохранения массы в узлах и потери давления при течении теплоносителя в ветках сети с учетом работы насосов:

$$\frac{dm_i}{d\tau} = \sum_{i1=1}^{NI} g_{i,i1},$$

$$\frac{dg_L}{d\tau} = \frac{1}{E_L} (Pin_L - Pout_L + \frac{\gamma_0}{\gamma} \cdot \xi_L \cdot g_L \cdot |g_L| + (\gamma H)_L - A_L \cdot g_L^2 + B_L \cdot g_L + C_L),$$

$$E_L = l / S,$$

где m_i – масса теплоносителя в i -ом узле; τ – время; i – номер узла в расчетной схеме от 1 до KUH ; KUH – количество узлов в расчетной схеме; $i1$ – номер образующей узел ветки от 1 до NI ; NI – количество веток, образующих узел; L – номер ветки в расчетной схеме от 1 до KG ; KG – количество веток в расчетной схеме; g_L – расход в ветке L ; E_L – постоянная времени изменения расхода в ветке L ; Pin_L – давление на входе в ветку L ; $Pout_L$ – давление на выходе из ветки L ; γ_0 – начальная плотность теплоносителя; γ – текущая плотность теплоносителя; ξ_L – коэффициент гидравлического сопротивления ветки L ; H – высотная отметка расчетного узла; A_L, B_L, C_L – коэффициенты, определяющие движущий напор насоса; l – длина ветки L ; S – сечение ветки L .

Для описания процессов теплообмена в активной зоне используется одномерное приближение. Уравнение для расчета температур в твэле и теплоносителе представляется в виде

$$\rho C_p \partial t / \partial \tau = \text{div} (\lambda \text{grad } t) + q_v,$$

где ρ – плотность топлива, оболочки твэла или теплоносителя; C_p – теплоемкость топлива, оболочки твэла или теплоносителя; t – температура топлива, оболочки твэла или теплоносителя; λ – коэффициент теплопроводности топлива, оболочки твэла или теплоносителя; q_v – объемное энерговыделение.

Теплообмен между поверхностью твэла и теплоносителем описывается с помощью граничного условия третьего рода (закон Ньютона-Рихмана):

$$(\partial t / \partial n)_c = -\alpha (t_c - t_{ж}) / \lambda,$$

где n – нормаль к поверхности твэла; c – индекс, указывающий на то, что температура и градиент относятся к поверхности твэла; α – коэффициент теплоотдачи от поверхности твэла к теплоносителю; t_c – температура поверхности твэла; $t_{ж}$ – температура теплоносителя.

После приведения исходной системы уравнений к конечно-разностному виду получаем систему

$$\begin{aligned} \frac{dt_{k,j}^c}{d\tau} &= \frac{1}{(V\gamma)_k^c} \left[K_{k,j} F_k (T_{k,j}^T - T_{k,j}^c) - \alpha_{k,j} F_k (T_{k,j}^c - T_{k,j}^B) \right], \\ \frac{dt_{k,j}^T}{d\tau} &= \frac{1}{(V\gamma)_k^T} \left[Q_{k,j} n_T - K_{k,j} F_k (T_{k,j}^T - T_{k,j}^c) \right], \\ \frac{dt_{k,j}^B}{d\tau} &= \frac{V_{k,j}^B}{V_k^B} \left[\alpha_{k,j} F_k (T_{k,j}^c - T_{k,j}^B) - g_k (t_{k,j}^B - t_{k,j}^{BX}) \right], \\ t_{k,j}^{BX} &= \begin{cases} t_{k,j}^B, & j \neq 1 \\ t_{k,j}^{BX}, & j = 1 \end{cases}, \end{aligned}$$

где $k = 1, \dots, NK$ – номер канала; NK – количество каналов; j – номер участка разбиения канала от 1 до NJ ; NJ – количество участков разбиения канала; $t_{k,j}^c$ – энтальпия стенки твэла j -го участка k -го канала; $(V\gamma)_k^c$ – масса стенки твэла k -го канала; $K_{k,j}$ – коэффициент теплопередачи от топлива к стенке твэла; F_k – поверхность теплоотдачи k -го канала; $T_{k,j}^T$ – температура топлива на j -ом участке k -го канала; $T_{k,j}^c$ – температура стенки твэла на j -ом участке k -го канала; $\alpha_{k,j}$ – коэффициент теплоотдачи от стенки твэла к теплоносителю; $T_{k,j}^B$ – температура теплоносителя на j -ом участке k -го канала; $t_{k,j}^B$ – энтальпия топлива j -го участка k -го канала; $(V\gamma)_k^T$ – масса топлива k -го канала; $Q_{k,j}$ – энерговыделение j -го участка k -го канала; n_T – относительная тепловая мощность; $t_{k,j}^{BX}$ – энтальпия теплоносителя j -го участка k -го канала; $V_{k,j}^B$ – удельный объем теплоносителя j -го участка k -го канала; V_k^B – объем теплоносителя k -го канала; g_k – массовый расход теплоносителя через k -ый канал; $t_{k,j}^{BX}$ – энтальпия теплоносителя на входе j -го участка k -го канала.

Начальные условия для всех блоков получаются из решения системы уравнений при нулевых производных по времени.

Уравнения точечной нейтронной кинетики учитывают шесть групп запаздывающих нейтронов и внешний источник:

$$\begin{aligned} \frac{dn}{d\tau} &= \frac{\rho - 1}{l/\beta} n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i + S, \\ \frac{dC_i}{d\tau} &= \frac{\beta_i}{l} n - \lambda_i C_i, \end{aligned}$$

где n – относительная нейтронная мощность; τ – время; ρ – реактивность активной зоны; β – суммарная эффективная доля запаздывающих нейтронов; l – среднее время жизни мгновенных нейтронов; λ_i – постоянная распада ядер-источников i -ой группы запаздывающих нейтронов; C_i – концентрация ядер-источников i -ой группы запаздывающих нейтронов; i – номер группы запаздывающих нейтронов от 1 до 6; S – мощность внешнего источника нейтронов; β_i – доля запаздывающих нейтронов i -ой группы.

Уравнение для расчета реактивности

$$\rho = \rho(\tau) + \rho_{ар} + \rho_{аз} + \rho_{ос} - \rho_{ст}$$

где $\rho(\tau)$ – зависимость реактивности от времени; $\rho_{ар}$ – реактивность, вводимая регулирующим органом автоматического регулятора; $\rho_{аз}$ – реактивность, вводимая регулирующим органом аварийной защиты; $\rho_{ос}$ – реактивность обратных связей, вводимая за счет изменения температур теплоносителя и топлива; $\rho_{ст}$ – величина компенсации реактивности для стационарного критического состояния.

Формула для расчета относительной мощности реактора в динамических режимах

$$n_T = n + n_{ост}$$

где $n_{\text{ост}}$ – относительная мощность остаточного энерговыделения.

Теплофизические свойства теплоносителя (натрия) [5] в расчетном коде PRISET задаются в табличном виде и интерполируются на требуемом диапазоне температуры (энтальпии) и давления. Способ определения теплофизических свойств конструкционных материалов определен в [4].

СРЕДА ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ SIMINTECH

SimInTech представляет собой универсальную систему автоматизации расчетов для моделирования явлений и процессов различной природы в сложных технических системах. Объектом моделирования в SimInTech может быть любая система, устройство или физический процесс, математическая модель динамики которого описывается системой дифференциально-алгебраических уравнений и может быть реализована методами структурного моделирования [6, 7].

SimInTech реализует принцип модельно-ориентированного проектирования, позволяющий совместить проектирование технологических систем с созданием их комплексных моделей динамики. Первоначально комплексная модель динамики может быть упрощенной, что обеспечивает проверку базовых принципов работы моделируемого объекта и его системы управления. По мере проектирования ее отдельные части могут уточняться и дополняться для максимально подробного соответствия реальному объекту [8 – 10].

Составленное технологами описание работы алгоритмов системы управления РУ может быть реализовано в виде математической модели АСУ ТП. Особый интерес представляет расчетная проверка работы системы управления РУ совместно с комплексной моделью динамики исследуемого объекта. Расчет переходных процессов РУ в различных режимах и условиях эксплуатации позволяет оценить работу системы управления и обнаружить алгоритмические ошибки на самой ранней стадии проектирования [11 – 13].

Современное развитие графических программных средств позволило на единой платформе совместить создание математической модели АСУ ТП и разработку для нее проектной документации, а также осуществить автоматизированную генерацию кода для приборов системы управления АЭС [14, 15].

ИНТЕГРАЦИЯ РАСЧЕТНОГО КОДА PRISET В СРЕДУ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ SIMINTECH

Исходные данные расчетной модели в коде PRISET задает пользователь в текстовом файле в виде отдельных массивов. При этом любое трансформирование расчетной схемы, например, корректировка состава моделей, количества узлов или расчетных веток, вызывает необходимость изменения текстового файла вручную. Даже самая незначительная модификация зачастую приводит к многочисленным переименованиям взаимосвязанных элементов и перенумерации узлов и веток в различных частях текстового файла. В расчетной схеме возрастает вероятность появления ошибок, что значительно увеличивает время на ее отладку. Иногда ошибки сохраняются и обнаруживаются только при неадекватном воспроизведении моделируемых явлений.

Исключить указанные недостатки позволяет интуитивно понятная графическая подсистема SimInTech, обеспечивающая создание математических моделей любой сложности и состава, а также их отладку (как целиком, так и по отдельным частям).

Для использования наиболее эффективного способа интеграции произведена перекompиляция расчетного кода PRISET в виде динамически загружаемой dll-библиотеки, у которой предусмотрен специализированный интерфейс для прямого доступа из внешних программ к внутренним массивам и переменным расчетного кода, а также для управления расчетом. Со стороны SimInTech разработан программный модуль расширения в виде динамически загружаемой dll-библиотеки для загрузки в оперативную память расчет-

ного кода PRISET и управления им при помощи интерфейса доступа.

Удовлетворение всех перечисленных потребностей обеспечивает модульная архитектура SimInTech, которая позволяет подключать модули для расчета систем разного класса. Связь между отдельными расчетными модулями осуществляется при помощи единой базы сигналов, которая создается по общим принципам при разработке конкретной комплексной модели динамики в соответствии с системой кодирования сигналов и соглашением по именам переменных.

Архитектура среды SimInTech и схема взаимосвязей ее компонентов показаны на рис. 1.

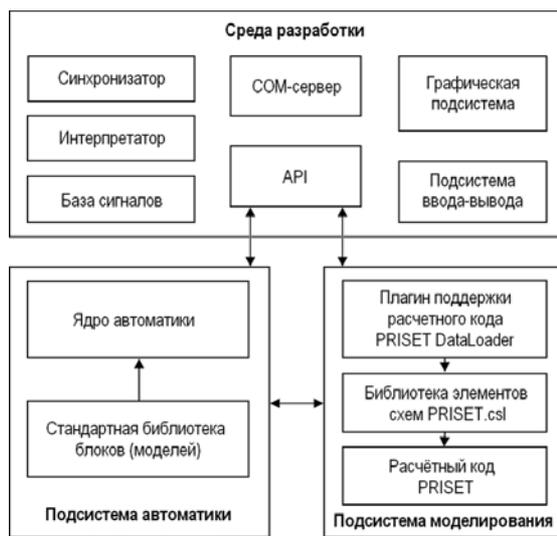


Рис. 1. Архитектура связи SimInTech с PRISET

В состав моделирующего комплекса SimInTech-PRISET входят

- среда разработки – редактор по созданию математических моделей систем различного типа с использованием сторонних расчетных кодов и программ;
- подсистема автоматизации – созданные пользователем алгоритмы систем управления и модели численно интегрируются с возможностью обмена данными с расчетными кодами;
- подсистема моделирования, отвечающая за моделирование логико-динамических систем, описываемых во входо-выходных отношениях, а также автоматическую генерацию исходного кода и отладку моделирующих программ для указанной целевой системы на заданном языке программирования.

Интеграция с SimInTech обеспечила следующие возможности расчетного кода PRISET:

- запись на диск текущего состояния расчетной модели (точки рестарта) для дальнейшего его использования в качестве исходного при перезапуске расчета;
- пакетный запуск проектов и обмен данными между ними для синхронных по модельному времени вычислений нескольких расчетных моделей, в том числе на разных компьютерах, удаленных друг от друга по сети;
- связанные расчеты с другими расчетными кодами, например электрическими и (или) моделями алгоритмов систем управления, что существенно расширяет область применения разрабатываемых комплексных моделей динамики;
- создание анимационных видеоклипов для контроля и управления расчетной моделью и ее параметрами.

КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ИЯУ МБИР

Разработанная комплексная модель динамики представляет собой программную реализацию математических моделей нейтронно-физических и теплогидравлических про-

цессов в реакторной установке ИЯУ МБИР [16 – 19]. Комплексная модель динамики создана в виде отдельной программы для ЭВМ, содержит все необходимые для проведения расчетов сведения.

Комплексная модель динамики максимально приближена к реальным технологическим системам объекта и содержит модель активной зоны (а.з.) реакторной установки, модель бокового экрана (БЭ), модель первого и второго контуров, модель контура системы аварийного отвода тепла (САОТ), модели насосов, теплообменников, парогенератора, баков [20, 21].

Приведенные в разделе описания расчетного кода PRISET уравнения и соотношения при их программной реализации решаются с наложением начальных и граничных условий, которые задаются в расчетной схеме. Для каждого расчетного элемента (блока) задаются не только топология, но и все необходимые параметры. Для узлов и элементов каналов – это диаметры участков, длины, угол наклона к вертикали, толщина стенки, теплоноситель (и его свойства), свойства конструкционного материала и прочие. Для расчетного элемента «активная зона» с классической моделью точечной кинетики задаются значения эффективной доли запаздывающих нейтронов, начальная подкритичность, время жизни мгновенных нейтронов, относительные доли и постоянные распада групп запаздывающих нейтронов. Для других расчетных блоков задаются соответствующие параметры.

На рисунке 2 представлен фрагмент модели а.з. и бокового экрана РУ МБИР.

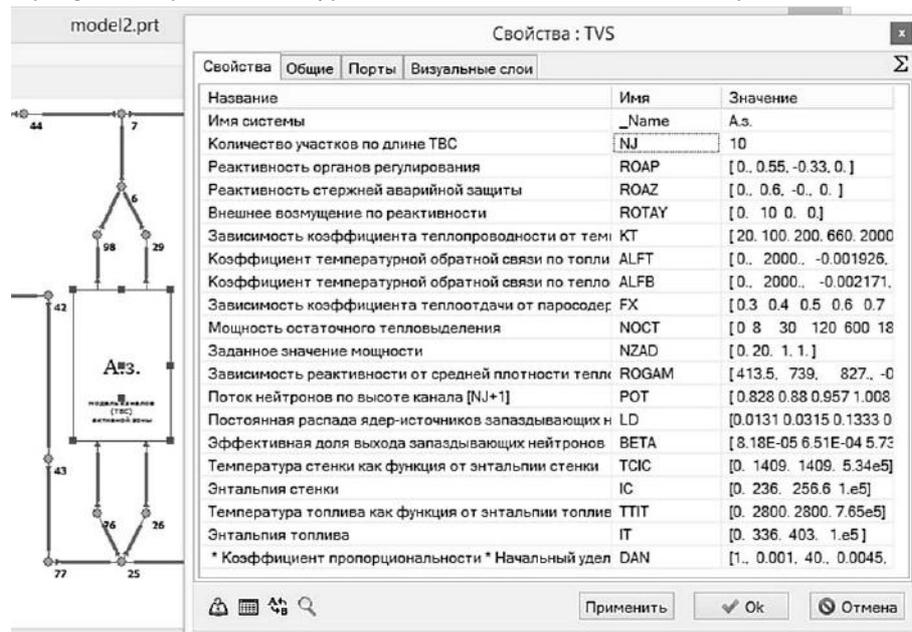


Рис. 2. Фрагмент модели активной зоны и бокового экрана РУ МБИР

Выполненная в виде субмодели а.з. представляет собой блок с полным набором контрольных параметров, необходимым для формирования файла ввода входных данных расчетного кода PRISET. Каждая ТВС а.з. и БЭ моделируется отдельным каналом с тепловыделением. Схема модели представлена на рис. 3. Совокупность параметризованных и топологически увязанных линиями связи расчетных элементов представляет собой расчетную схему, по которой формируется файл входных данных для теплогидравлического кода PRISET.

В качестве примера работы с графической подсистемой SimInTech при создании комплексной модели динамики для расчетного кода PRISET на рис. 4 приведена панель инстру-

ментов, фрагмент технологической блок-схемы и графики изменения контрольных параметров.

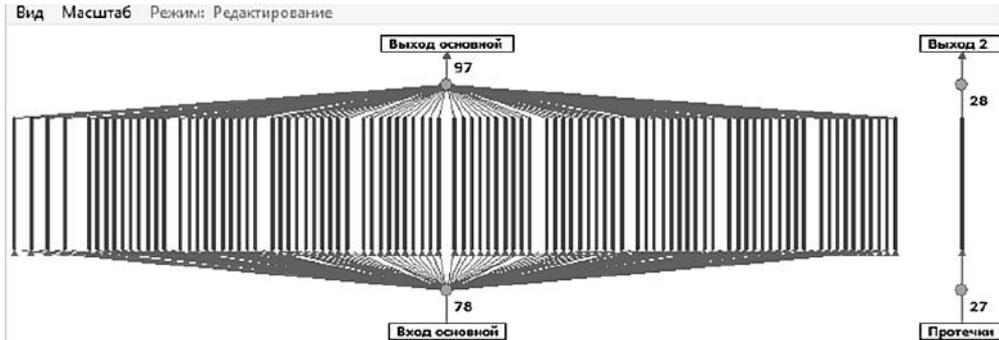


Рис. 3. Фрагмент нодализационной схемы модели а. з. и БЭ

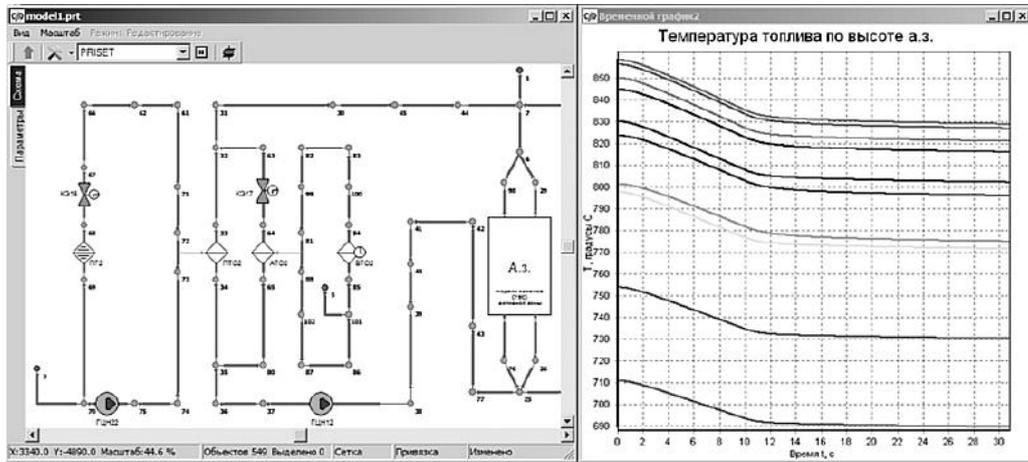


Рис. 4. Интерфейс пользователя с частью нодализационной схемы и результатами расчета (фрагмент)

ПРОВЕРКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОМПЛЕКСНОЙ МОДЕЛИ

Для подтверждения работоспособности модели динамики РУ МБИР выполнено тестовое расчетное моделирование стационарного состояния, соответствующего номинальной тепловой мощности, и некоторых переходных процессов.

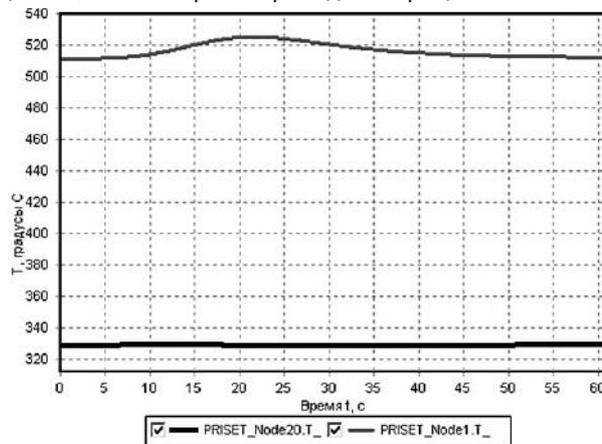


Рис. 5. График температуры натриевого теплоносителя на входе и выходе активной зоны

Результаты расчета переходного процесса с внешним кусочно-линейным возмущением по реактивности порядка $0,3 \cdot \beta_{эф}$ за первые 10 секунд, спадающим до нуля к 20-ой

секунде, представлены на рис. 5 и 6.

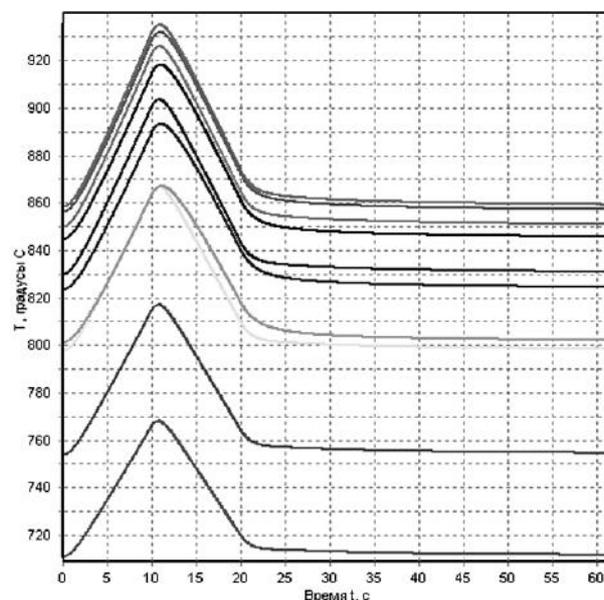


Рис. 5. График температуры топлива на различных участках активной зоны по высоте

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализована интеграция расчетного кода PRISET в среду динамического моделирования SimInTech и разработан инженерный инструмент в виде комплексной модели динамики ИЯУ МБИР.

Выполненная интеграция значительно ускорила процесс моделирования сложных технологических систем в составе РУ МБИР и обеспечила взаимную синхронизацию расчета различных частей математической модели по времени и исходным данным. Возможности создания расчетных схем с большим количеством узлов и ветвей, копирования повторяющихся элементов и систем в составе математической модели и многопоточного выполнения расчетов существенно повысили качество проектирования и расширили возможности по комплексному расчетному обоснованию РУ.

Практическая значимость разработанной комплексной модели динамики заключается в возможности ее использовании на всех этапах жизненного цикла объекта. При эскизном проектировании она позволяет получить общее представление о поведении объекта и подобрать наиболее оптимальный состав оборудования и его параметров. В процессе рабочего проектирования с помощью комплексной модели динамики можно производить уточнение принятой конструкции для обеспечения выполнения требований технического задания на проект. При необходимости на этом этапе модель и сам расчетный код могут быть скорректированы и уточнены за счет использования результатов расчетов прецизионных расчетных кодов, например, трехмерных нейтронно-физических или теплогидравлических кодов CFD-класса. При эксплуатации комплексная модель динамики применима для обучения персонала в качестве тренажера [14] и для анализа работы систем и оборудования при модернизации.

Верифицированная комплексная модель динамики в составе математических моделей теплогидравлических контуров, модели нейтронной физики и модели алгоритмов системы управления позволяет выполнять расчеты в обоснование безопасности РУ и для проверки работы АСУ ТП в ее составе [15 – 19].

Литература

1. *Svyatkin M.N., Izhutov A.L., Zhemkov I.Y. et. al.* Purpose and priority tasks of a Russian multi-function fast research reactor. – Kyoto: Book of Extendedsynopses, FR09, 2009. – PP. 115-120.
2. *Габараев Б.А., Лопаткин А.В., Третьяков И.Т., Хмельщиков В.В., Аксенов В.Л.* Исследовательские реакторы – Взгляд в будущее. // Атомная энергия. – 2007. – Т. 103. – Вып. 1. – С. 65-70.
3. *Драгунов Ю.Г., Третьяков И.Т., Лопаткин А.В., Романова Н.В., Лукасевич И.Б.* Многоцелевой быстрый исследовательский реактор (МБИР) – инновационный инструмент для развития ядерных энерготехнологий. // Атомная энергия. – 2012. – Т. 113. – Вып. 1. – С. 25-28.
4. *Платонов И.В., Ларионов И.А., Долгов Ю.А.* Связанный нейтронно-физический и теплогидравлический программный комплекс PRISET-MBIR для исследования переходных и аварийных режимов и обоснования безопасности. // ВАНТ. Сер. Обеспечение безопасности АЭС. Исследовательские реакторы. – 2013. – Вып. 33. – С. 59-67.
5. *Чиркин В.С.* Теплофизические свойства материалов ядерной техники. – М.: Атомиздат. – 1968. – 238 с.
6. *Козлов О.С., Кондаков Д.Е., Скворцов Д.М., Тимофеев К.А., Ходаковский В.В.* Программный комплекс для исследования динамики и проектирования технических систем. // Информационные технологии. – 2005. – № 9. – С. 20-25.
7. *Паршиков И.А., Петухов В.Н., Тимофеев К.А., Ходаковский В.В.* Программный комплекс SimInTech для моделирования сложных технических систем. / Труды Международной научно-технической конференции «Компьютерное моделирование 2013». – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2013. – С. 82-87.
8. *Колесов Ю.Б.* Объектно-ориентированное моделирование сложных динамических систем. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. – С. 10-21.
9. *Щекатуров А.М., Паршиков И.А.* Концепция модельно-ориентированного проектирования АЭС с использованием программного комплекса SimInTech. / Сб. трудов научно-технической конференции «Теплофизика реакторов на быстрых нейтронах (Теплофизика-2012)». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2012. – С. 79.
10. *Петухов В.Н., Паршиков И.А., Щекатуров А.М., Тимофеев К.А.* Модельно-ориентированное проектирование в SimInTech. // Атомный проект. – 2014. – № 17. – С. 54-58.
11. *Баум Ф.И., Козлов О.С., Паршиков И.А., Петухов В.Н., Тимофеев К.А., Щекатуров А.М.* Программное обеспечение SimInTech для программирования приборов систем управления. // Атомная энергия. – 2012. – Т. 113. – Вып. 6. – С. 354-357.
12. *Щекатуров А.М., Тимофеев К.А., Козлов О.С.* Методика разработки функционального программного обеспечения АСУ ТП ЯЭУ с применением модельно-ориентированного подхода в SimInTech. // Университетский научный журнал. – 2015. – № 15. – С. 80-87.
13. *Щекатуров А.М. и др.* Методика разработки функционального программного обеспечения АСУ ТП ЯЭУ с применением модельно-ориентированного подхода в SimInTech. / Сб. трудов Международной научно-технической конференции «Компьютерное моделирование - 2015». – СПб.: Изд-во СПбГПУ. – С. 140-152.
14. *Лебедев В.О., Толоконский А.О., Королев С.А., Власов В.А.* Внедрение опыта создания АСУ ТП объектов атомной отрасли на базе ПТК Умикон в учебный процесс. // Известия вузов. Ядерная Энергетика. – 2014. – №2. – С. 149-155.
15. *Бибииков В.В., Кольцов В.А., Насташенко В.А., Харченко С.А.* Автоматизация контроля и управления электромеханическим оборудованием атомной электростанции. // Атомный проект. – 2013. – № 15. – С. 66-68.
16. *Паршиков И.А., Петухов В.Н., Тимофеев К.А., Щекатуров А.М., Боровицкий С.А., Шмаков Д.Ю.* Разработка и применение комплексной динамической модели реакторной установки СВБР-100 для проектирования опытно-промышленного энергоблока. // ВАНТ. Сер. Обеспечение безопасности АЭС. Исследовательские реакторы. – 2013. – Вып. 33. – С. 5-17.
17. *Parshikov I.A., Petukhov V.N., Timofeev K.A., Shchekaturov A.M.* Simulation of nuclear power plant with heavy liquid metal-cooled reactor in SimInTech. St. Petersburg. // Humanities & Science University Journal. – 2013. – №5. С. 144-156.
18. *Паршиков И.А., Щекатуров А.М., Тимофеев К.А., Петухов В.Н., Ходаковский В.В.* Создание комплексной модели динамики реакторной установки с жидкометаллическим теплоносителем с использованием среды разработки SimInTech. / Труды Международной научно-технической конференции «Компьютерное моделирование - 2013». – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2013. – С. 175-182.

19. *Паршиков И.А., Петухов В.Н., Тимофеев К.А., Щекатуров А.М., Боровицкий С.А., Шамаков Д.Ю.* Разработка и применение комплексной динамической модели реакторной установки СВБР-100 для проектирования опытно-промышленного энергоблока. / Сборник трудов конференции «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях» (ТЖМТ-2013). Том 1. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2013. – С. 12-13.

20. *Черный В.А., Бурьевский И.В., Стогов В.Ю.* Оптимизация активной зоны реакторной установки МБИР. / Научно-технический сборник. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2011. – С. 26-29.

21. *Власов М.Н., Корсун А.С., Маслов Ю.А., Меринов И.Г., Харитонов В.С.* Моделирование теплогидравлических процессов в активных зонах реакторов на быстрых нейтронах. Сборник трудов научно-технической конференции «Теплофизика реакторов на быстрых нейтронах» (Теплофизика -2012). – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2012. – С. 27-28.

Поступила в редакцию 24.06.2016 г.

Авторы

Паршиков Игорь Александрович, главный специалист
E-mail: rogi7@mail.ru

Долгов Юрий Алексеевич, главный научный сотрудник
dolgov@nikiet.ru

Ларионов Игорь Александрович, инженер
larionov@nikiet.ru

Щекатуров Александр Михайлович, ведущий инженер-программист
a.shchekaturov@3v-services.com

UDC 621.039.526.034

DEVELOPMENT OF THE INTEGRATED MODEL OF MBIR RESEARCH REACTOR FACILITY IN THE SIMINTECH SIMULATION ENVIRONMENT USING THE PRISET ESTIMATE CODE

Parshikov I.A.*, Dolgov Yu.A.**, Larionov I.A.**, Shchekaturov A.M.*

* LLC «3V Services». 25 b.1 Trubnaya str., Moscow, 127051 Russia

** JSC «NIKIET». 2/8 M. Krasnoselskaya str., Moscow, 107140 Russia

ABSTRACT

Safety analysis of the reactor facility in the process of design requires the use of not only calculation codes for analyzing processes of different nature but, as well, the use of convenient tools for developing mathematical models of process systems. Simulation tools are expected to support multivariate optimization calculations enabling the designer and (or) the developer to verify the adopted design solutions and to update the design, the composition and the operating parameters of process systems. At the same time, entering any amendments in the design and development documentation shall be accompanied by the analysis of their effects not only on the particular system but also on the reactor facility as the whole. Integrated dynamic model provides for the timely and comprehensive computational verification.

Integrated model of the MBIR sodium liquid metal cooled nuclear research facility was built as part of the present study using the SimInTech dynamic simulation environment and the PRISET one-dimensional coupled neutronics and thermal hydraulics code. The integrated model designed as the engineering tool represents the software implementation of processes of different nature taking place in the reactor facility and includes mathematical models of all safety-related process systems. Also, the SimInTech dynamic simulation environment and the PRISET code were upgraded. The developed

user interface, jointly with the model of algorithms, enables integrated calculations for the safety case of the reactor facility. The performed test calculations with the obtained local and integral parameters in transients prove that the integrated model of the MBIR nuclear research facility is serviceable.

The structure of the integrated model's simulation tools makes it possible to use it as a simulator in the operating personnel training and as an aid for optimizing the man-machine interface in the development of operator panels.

The field of application of the integrated model is not limited by the MBIR facility. It can be used for safety analysis of any pool-type research reactors, pressurized water research reactors, commercial pool-type reactor facilities, as well as liquid metal cooled reactors.

Key words: control systems algorithms, complex model, neutron physics processes, safety analysis, design, PRISET calculation code, SimInTech process systems dynamic modeling environment, MBIR reactor facility, thermal hydraulic processes

REFERENCES

1. Svyatkin M.N., Izhutov A.L., Zhemkov I.Y., Tretiakov I.T., Lopatkin A.V., Poplavsky V.M., Kochetkov L.A., Cherny V.A., Petrov Y.I., Zavadsky M.I., Yamov V.Y., Vasiliev B.A., Shkarin V.I., Trunov N.B., Chaban V.A. Purpose and priority tasks of a Russian multi-function fast research reactor. Kyoto: Book of Extended synopses, FR09, 2009, pp. 115-120.
2. Gabaraev B.A., Lopatkin A.V., Tretiyakov I.T., Khmelshchikov V.V., Aksenov V.L. Research Reactors – Looking into the Future. *Atomnaya energiya*. 2007, v. 103, iss. 1, pp. 65-70 (in Russian).
3. Dragunov Yu.G., Tretiyakov I.T., Lopatkin A.V., Romanova N.V., Likasevich I.B. Multipurpose Fast Research Reactor (MBIR), and Innovative Tool for the Nuclear Power Technology Evolution. *Atomnaya energiya*. 2012, v. 113, iss. 1, pp. 25-28 (in Russian).
4. Platonov I.V., Larionov I.A., Dolgov Yu.A. Coupled neutron-physics and thermal hydraulic PRISET-MBIR software package for studies of transients and emergencies and safety analysis. *VANT. Ser. Obespechenie bezopasnosti AES. Issledovatel'skie reaktory*. 2013, iss. 33, pp. 59-67 (in Russian).
5. Chirkin V.S. Thermal properties of the materials in the nuclear engineering. Moscow. Atomizdat Publ., 1968, 238 p. (in Russian).
6. Kozlov, O.S., Kondakov, D.E., Skvortsov, L.M., Timofeev, K.A., Khodakovskiy, V.V. Software for the study of the dynamics and the design of technical systems. *Informatsionnye tekhnologii*. 2005, no. 9, pp. 20-25 (in Russian).
7. Parshikov I.A., Petukhov V.N., Timofeev K.A., Khodakovskiy V.V. SimInTech software for the simulation of complex technical systems. Proceedings of the International scientific-technical conference «Computer modeling 2013». St.Petersburg. SPbGPU Publ., 2013, pp. 82-87 (in Russian).
8. Kolesov Yu.B. Object-oriented modeling of complex dynamical systems. St.Petersburg. SPbGPU Publ., 2004, pp. 10-21 (in Russian).
9. Shchekaturov A.M., Parshikov I.A. Object-oriented modeling in SimInTech software. Proceedings of the scientific-technical conference «Thermal physics of fast reactors (Thermal physics - 2012)». Obninsk. GNC RF-FEI Publ., 2012, p. 79 (in Russian).
10. Petukhov V.N., Parshikov I.A., Shchekaturov A.M., Timofeev K.A. Use of SimInTech Development Environment for Liquid Metal Cooled Reactor Plant Complex Dynamics Modeling. *Atomnyj projekt*. 2014, v. 17, pp. 54-58. (in Russian).
11. Baum F.I., Kozlov O.S., Parshikov I.A., Petukhov V.N., Timofeev K.A., Shchekaturov A.M. Software SimInTech for a program logic controllers of control system. *Atomnaya energiya*, 2012, v. 113, iss. 6, pp. 354-357 (in Russian).
12. Shchekaturov A.M., Timofeev K.A., Kozlov O.S. Method to develop functional software for NPP APCS using model-oriented approach in SimInTech. *Universitetskiy Nauchny Zhurnal*. 2015, iss. 15, pp. 80-87 (in Russian).
13. Shchekaturov A.M., Kozlov O.S., Timofeev K.A. Methodology for the development of functional software of computer aided process control system for nuclear power facilities

using the object-oriented approach implemented in SimInTech software. Proceedings of the International scientific-technical conference «Computer modeling – 2015». St. Petersburg. SPbGPU Publ., 2015, pp. 140-152 (in Russian).

14. Lebedev V.O., Tolokonsky A.O., Korolev S.A., Vlasov V.A. Implementation of the experience in designing computer aided process control systems for nuclear facilities based on UMIKON package in the educational process. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2014, no. 2, pp. 149-155 (in Russian).

15. Bibikov V.V., Koltsov V.A., Nastashchenko V.A., Kharchenko S.A. Automation of electrical equipment control system at nuclear power plant. *Atomny proekt*. 2013, v. 15, pp. 66-68 (in Russian).

16. Parshikov I.A., Petukhov V.N., Timofeev K.A., Shchekaturov A.M., Borovitsky S.A., Shmakov D.Yu. Development and application of a complex dynamic model of the reactor plant SVBR-100 for the design of pilot power unit. *VANT. Ser. Obespechenie bezopasnosti AES. Issledovatel'skie reaktory*. 2015, iss. 3, pp. 5-17 (in Russian).

17. Parshikov I.A., Petukhov V.N., Timofeev K.A., Shchekaturov A.M. Simulation of nuclear power plant with heavy liquid metal-cooled reactor in SimInTech. St. Petersburg. *Humanities & Science University Journal*. 2013, no. 5, pp. 144-156.

18. Parshikov I.A., Shchekaturov A.M., Timofeev K.A., Petukhov V.N., Khodakovskiy V.V. Complex model of nuclear power plant with heavy liquid metal-cooled reactor development environment in SimInTech software. Proceedings of the International scientific-technical conference «Computer modeling – 2013». St. Petersburg. SPbGPU Publishing, 2013, pp. 175-182 (in Russian).

19. Parshikov I.A., Petukhov V.N., Timofeev K.A., Shchekaturov A.M., Borovitsky S.A., Shmakov D.Yu. Development and application of a complex dynamic model of SVBR-100 reactor plant for the design of pilot power unit. Proceedings of the scientific conference «Heavy liquid metal coolants in nuclear technology: (HLMC-2013)». Obninsk. GNC RF-FEI Publ., 2013, pp. 12-13 (in Russian).

20. Cherny V.A., Burievskiy I.V., Stogov V.Yu. Optimization of the core of the reactor facility MBIR. Scientific-technical papers. Obninsk. GNC RF-FEI Publ., 2011, pp. 26-29 (in Russian).

21. Vlasov M.N., Korsun A.S., Maslov Yu.A., Merinov I.G., Kharitonov V.S. Modelling of thermal hydraulic processes in cores of fast reactors. Proceedings of the scientific-technical conference «Thermal physics of fast reactors (Thermal physics - 2012)». Obninsk. GNC RF-FEI Publ., 2012, pp. 27-28 (in Russian).

Authors

Parshikov Igor' Alexandrovich, Lead Specialist

E-mail: rogi7@mail.ru

Dolgov Yury Alekseevich, Principal Research Scientist

E-mail: dolgov@nikiet.ru

Larionov Igor Alexandrovich, Engineer

E-mail: larionov@nikiet.ru

Shchekaturov Aleksandr Mikhailovich, Senior Software Engineer

E-mail: a.shchekaturov@3v-services.com