

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

**И.А. Паршиков, А. М. Щекатуров**

*ООО «3В Сервис», 127051, Россия, г. Москва, Трубная ул., 25 к.1*

**Ю.А. Долгов, И.А. Ларионов**

*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. При этом любое внесение изменений в проектно-конструкторскую документацию должно сопровождаться анализом их влияния не только на конкретную систему, но и на всю реакторную установку в целом. Своевременную и необходимую расчетную проверку обеспечивает комплексная модель динамики.

В рамках настоящей работы 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 комплексная модель представляет собой программную реализацию процессов различной природы в реакторной установке и содержит математические модели всех важных для безопасности технологических систем. Также 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 реакторной установки. Проведенные тестовые расчеты с получением локальных и интегральных параметров в переходных процессах подтверждают работоспособность комплексной модели ИЯУ МБИР.

Состав средств моделирования комплексной модели обеспечивает её 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

## **ВСТУПЛЕНИЕ**

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. Моделирование позволяет исследовать процессы различной природы (теплогидравлика, нейтронная физика, работа системы управления и защиты и прочие) и получать характеристики поведения важных для безопасности параметров (мощность реактора, расход, температура и давление теплоносителя и прочие) в различных режимах эксплуатации. 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 за авариями. Расчетный анализ поведения реакторной установки минимизирует последствия аварий за счет обеспечения подбора наиболее эффективного состава технических средств и их параметров.

Поведение исследуемого объекта во времени и его динамические свойства в виду сложности происходящих явлений может быть описано только с помощью комплексных моделей динамики [1-3]. 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.

Важным элементом комплексной модели динамики является расчетная (нодализационная) схема, описывающая геометрию и параметры элементов оборудования и систем. В большинстве своем, сначала расчетную схему вручную прорисовывают на листах бумаги, набирая модель из элементарных объектов расчетного кода (канал, камера, тепловой элемент и прочие). Затем её описывают на специализированном языке ввода входных данных расчетного кода в текстовых редакторах с получением сотен страниц машинописного текста, с которыми сложно работать, проверять и анализировать. При этом разработанная базовая расчетная схема, как правило, видоизменяется под конкретный

рассматриваемый аварийный процесс: корректируют количество контрольных объемов, расположение расчетных узлов, нодализацию узлов течи, граничные и начальные условия и др. Неизменным остается требование сохранения параметров комплексной модели динамики исследуемого объекта, соответствующих реальным характеристикам оборудования и систем в его составе.

В настоящей статье описана 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 PRASET для анализа теплогидравлических и нейтронно-физических процессов в реакторной установке 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 PRASET**

PRASET – 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].

Область применения PRASET:

- нормальные эксплуатационные режимы с учетом работы системы автоматического регулирования мощности;
- пусковые режимы;
- режимы разогрева и расхолаживания реакторной установки;
- аварийные режимы, обусловленные отказами технологического оборудования, систем управления и обеспечивающих систем.

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

Математическая модель реакторной установки в PRASET содержит уравнения, подробно описывающие теплогидравлические процессы в тепловыделяющем канале и элементов 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, имеющих необходимые входные и выходные параметры. Описывающие переходные процессы расчетные модели можно создавать с требуемой степенью детализации. Принципиальная расчетная схема установки представляет собой разветвленную гидравлическую сеть произвольной конфигурации с возможностью включения различных элементов: участок трубопровода, отсечной или обратный клапан, циркуляционный насос, тепловыделяющий канал, канал теплообменника или парогенератора и прочие.

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. Узлы предназначены 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. 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.). 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:

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

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

$$E_L = l / S,$$

где  $m_i$  - масса теплоносителя в  $i$ -ом узле;

$\tau$  - время;

$i$  - номер узла в расчетной схеме от 1 до КУН;

КУН - 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  $L$ ;

$P_{вх_L}$  - давление на входе в ветку  $L$ ;

$P_{вых_L}$  - давление на выходе из ветки  $L$ ;

$\gamma_0$  - начальная плотность теплоносителя;

$\gamma$  - текущая плотность теплоносителя;

$\xi_L$  - 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. Уравнения теплового баланса записываются через энтальпию, что позволяет проще описывать процессы изменения фазового состояния:

$$\frac{d\mathbf{t}_{k,j}^C}{d\tau} = \frac{1}{(V\gamma)_k^C} \left[ K_{k,j} F_k (T_{k,j}^T - T_{k,j}^C) - \alpha_{k,j} F_k (T_{k,j}^C - T_{k,j}^B) \right],$$

$$\frac{d\mathbf{t}_{k,j}^T}{d\tau} = \frac{1}{(V\gamma)_k^T} \left[ Q_{k,j} n_T - K_{k,j} F_k (T_{k,j}^T - T_{k,j}^C) \right],$$

$$\frac{d\mathbf{t}_{k,j}^B}{d\tau} = \frac{V_{k,j}^B}{V_k^B} \left[ \alpha_{k,j} F_k (T_{k,j}^C - T_{k,j}^B) - g_k (\mathbf{t}_{k,j}^B - \mathbf{t}_{k,j}^{BX}) \right],$$

$$\mathbf{t}_{k,j}^{BX} = \begin{cases} \mathbf{t}_{k,j}^B, & \text{если } j \neq 1 \\ \mathbf{t}_k^{BX}, & \text{если } j = 1 \end{cases},$$

где  $k = (1 \div NK)$  - номер канала;

$NK$  - количество каналов;

$j$  - номер участка разбиения канала от 1 до  $NJ$ ;

$NJ$  - количество участков разбиения канала;

$\mathbf{t}_{k,j}^C$  - 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;

$\mathbf{t}_{k,j}^T$  - 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;

$u_{k,j}^B$  - энтальпия теплоносителя  $j$ -го участка  $k$ -го канала;

$V_{k,j}^B$  - удельный объем теплоносителя  $j$ -го участка  $k$ -го канала;

$\bar{V}_k^B$  - объем теплоносителя  $k$ -го канала;

$g_k$  - массовый расход теплоносителя через  $k$ -ый канал;

$u_{k,j}^{BX}$  - энтальпия теплоносителя на входе  $j$ -го участка  $k$ -го канала.

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

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - 1}{\beta} n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i + S,$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\lambda_i} n - C_i,$$

где  $n$  - относительная нейтронная мощность;

$\tau$  - время;

$\rho$  - реактивность активной зоны;

$\beta$  - суммарная эффективная доля запаздывающих нейтронов;

$l$  - среднее время жизни мгновенных нейтронов;

$\lambda_i$  - 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;

$\beta_i$  - доля запаздывающих нейтронов  $i$ -ой группы.

Уравнение для расчета реактивности:

$$\rho = \rho(\tau) + \rho_{ap} + \rho_{az} + \rho_{oc} - \rho,$$

$$\rho(\tau) = f(\tau),$$

где  $\rho(\tau)$  - зависимость реактивности от времени;

$\rho_{ap}$  - реактивность, вводимая регулирующим органом автоматического регулятора;

$\rho_{az}$  - реактивность, вводимая регулирующим органом аварийной защиты;

$\rho_{oc}$  - 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.

## СРЕДА ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ SIMINTECH

SimInTech представляет собой универсальную систему автоматизации расчётов для моделирования явлений и процессов различной природы в сложных технических системах [5]. 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.

Основные возможности SimInTech:

- 1) расширяемая модульная структура – возможность интеграции сторонних расчетных кодов и программ различного назначения без их кардинальной модернизации;
- 2) система создания и редактирования технологических блок-схем – пользователь на технологической блок-схеме в графическом редакторе набирает расчетную модель из отдельных блоков;
- 3) библиотека блоков (моделей) – любой блок можно наполнить необходимой математикой и настроить параметры его отображения;
- 4) вложенность структурных схем – любой фрагмент расчетной схемы (набора взаимосвязанных блоков) может быть представлен в виде субмодели - макроблока с возможностью его исполнения в любом другом блоке;
- 5) встроенный скриптовый язык – использование автоматической параметризации расчётной схемы;
- 6) встроенная система анимации – создание в графическом редакторе видеокадров управления математической моделью;
- 7) встроенные средства обработки результатов расчетов – удобное отображение значений контрольных параметров в виде таблиц данных или графиков с возможностью записи в файлы.

SimInTech реализует принцип модельно-ориентированного проектирования, позволяющий совместить проектирование технологических систем с созданием их комплексных моделей динамики [6-9]. Первоначально комплексная модель динамики может быть упрощённой, что обеспечивает проверку базовых принципов работы моделируемого объекта и его системы управления. По мере проектирования её отдельные части могут уточняться и дополняться для максимально подробного соответствия реальному объекту. Подход существенно сокращает сроки проектирования и ошибки при неправильной интерпретации моделей.

Модульная структура SimInTech и универсальный набор объектов в графическом редакторе позволяют формировать технологические блок-схемы для различных расчётных кодов. Расширяемая библиотека блоков и открытый программный интерфейс дают

разработчику возможность создавать собственные модули для поддержки требуемых расчётных и программных модулей.

Потребительские качества SimInTech по созданию математических моделей обеспечивают расширение круга пользователей за счет специалистов, не имеющих углублённых знаний по программированию и расчетному моделированию, но обладающих компетенциями в технологии объекта. Составленное технологами описание работы алгоритмов системы управления РУ может быть реализовано в виде математической модели АСУ ТП [10]. 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.

Современное развитие графических программных средств позволило на единой программной платформе совместить создание математической модели АСУ ТП и разработку для неё проектной документации, а также осуществить автоматизированную генерацию кода для приборов системы управления АЭС [10].

## **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 её 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) [11-12].

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

Применительно к реакторной установке МБИР сформулированы следующие вопросы:

- при обосновании безопасности реакторной установки на этапе эскизного проектирования требуется рассмотрение большого количества вариантов компоновки, что приводило к увеличению времени расчета;
- для проведения адекватного анализа переходных и аварийных режимов реакторной установки необходим синхронный расчет теплогидравлических и нейтронно-физических процессов с учетом влияния системы управления;
- в процессе проведения расчетных исследований необходимо изменять исходные параметры и анализировать их влияние на ход динамического процесса;
- при анализе переходных и аварийных режимов с длительным расхолаживанием требуется сохранять состояние расчета - создавать точки рестарта для дальнейшего перезапуска.

Удовлетворение всех перечисленных потребностей обеспечивает модульная архитектура SimInTech, которая позволяет подключать модули для расчёта 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 отдельных частей представлена на рисунке 1.

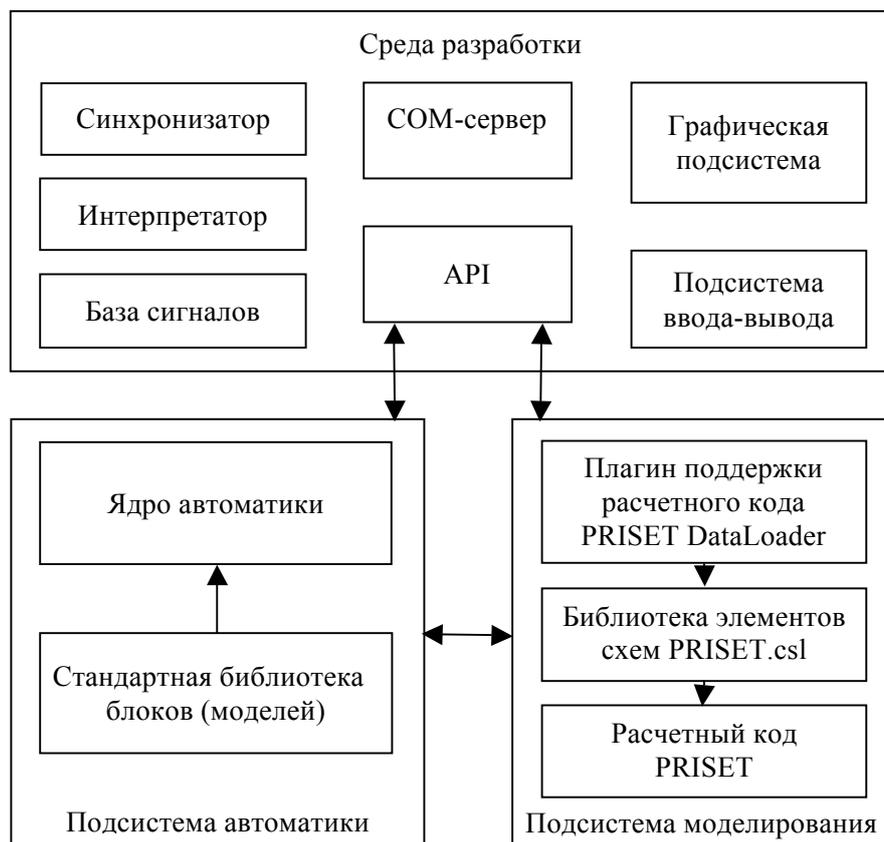


Рис. 1. Архитектура связи SimInTech с PRISET

Состав моделирующего комплекса SimInTech-PRISSET:

- 1) среда разработки – редактор по созданию математических моделей систем различного типа с использованием сторонних расчетных кодов и программ;
- 2) подсистема автоматизации – созданные пользователем алгоритмы систем управления и модели численно интегрируются с возможностью обмена данными с расчетными кодами;
- 3) подсистема моделирования – отвечает 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 также обеспечила следующие возможности расчетного кода PRISSET:

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

## **КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ИЯУ МБИР**

Разработанная комплексная модель динамики представляет собой программную реализацию математических моделей нейтронно-физических и теплогидравлических процессов в реакторной установке ИЯУ МБИР. Комплексная модель динамики создана в виде отдельной программы для ЭВМ, содержит все необходимые для проведения расчётов сведения и предназначена для:

- 1) расчетного анализа переходных процессов в реакторной установке в различных режимах эксплуатации – при нормальных условиях эксплуатации и с нарушением нормальных условий эксплуатации, включая аварийные режимы;
- 2) помощи в принятии проектных решений по составу технологических систем и параметрам входящего в них оборудования;
- 3) расчетной отладки работы системы управления в связанной с комплексной моделью динамики постановке;
- 4) отработки человеко-машинного интерфейса при создании виртуальных пультов оператора.

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.

На рисунке 2 представлена модель активной зоны и бокового экрана РУ МБИР.

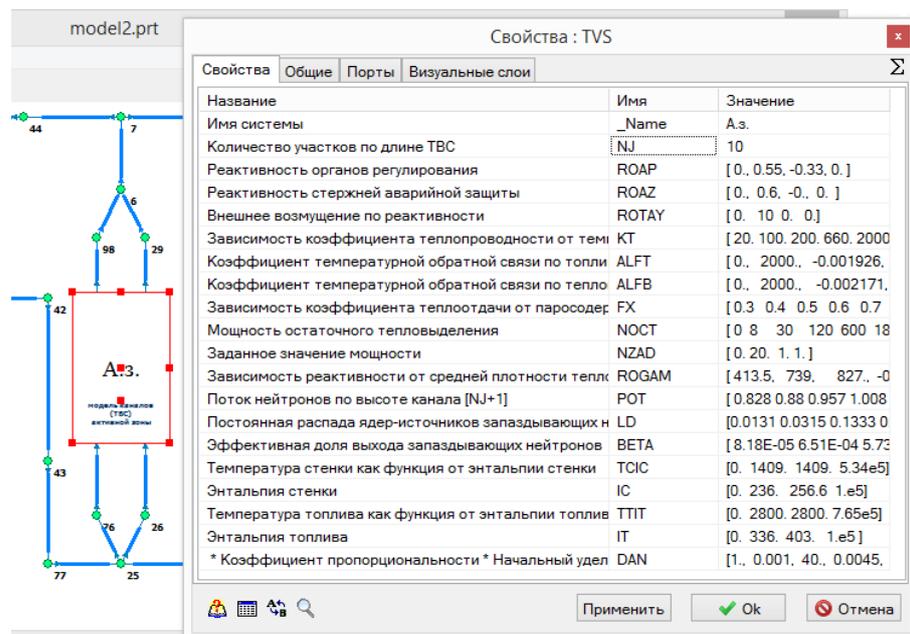


Рис. 2. Свойства субмодели активной зоны

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. Расчетная схема представлена на рисунке 3.

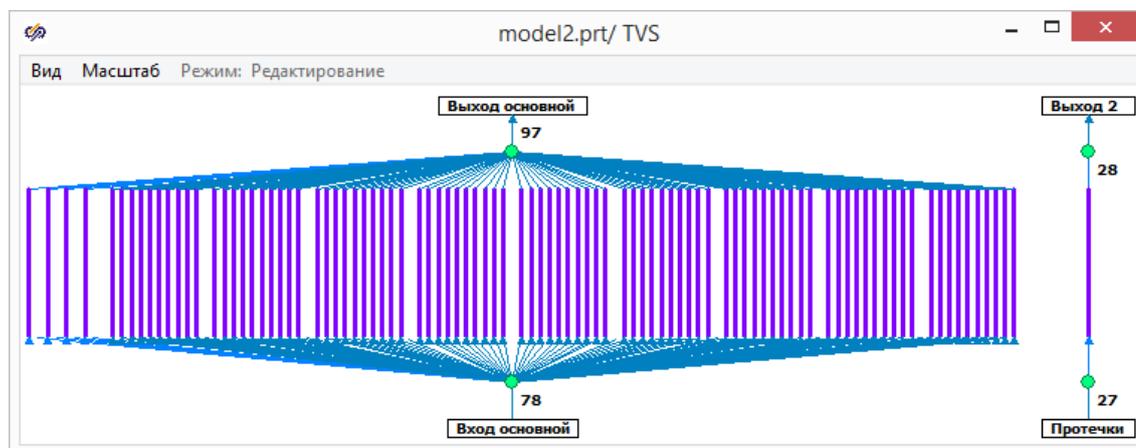


Рис. 3. Нодализационная схема модели а. з. и БЭ

В качестве примера работы с графической подсистемой SimInTech при создании комплексной модели динамики для расчетного кода PRISET на рисунке 4 приведена панель инструментов, фрагмент технологической блок-схемы и графики изменения контрольных параметров.

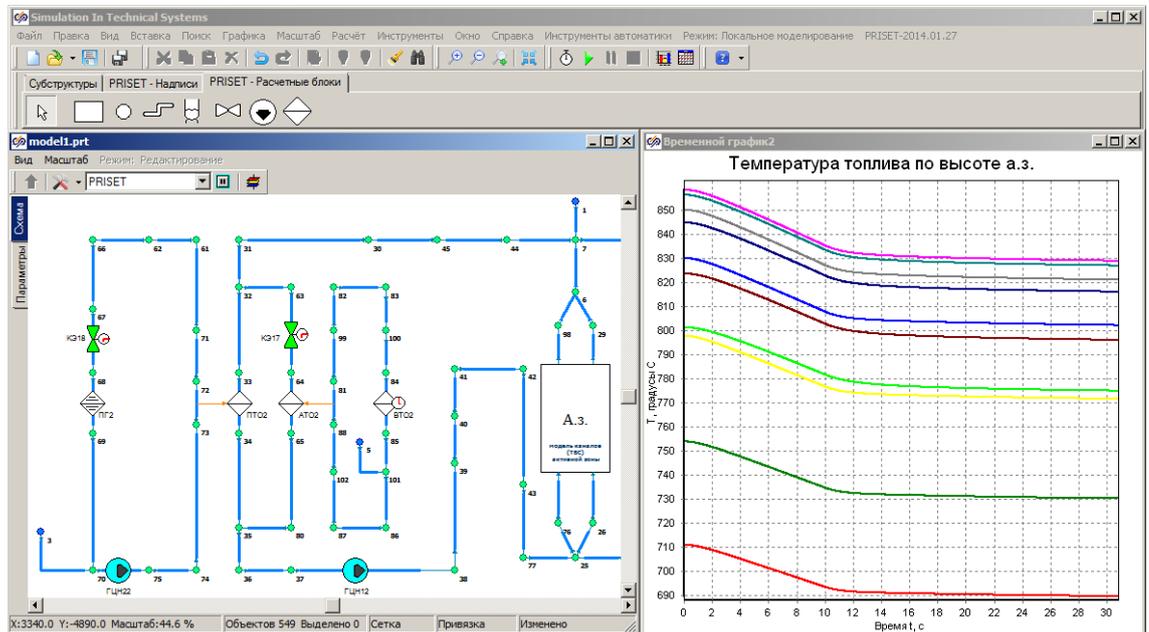


Рис. 4. Интерфейс пользователя с частью нодализационной схемы и результатами расчета

## ПРОВЕРКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОМПЛЕКСНОЙ МОДЕЛИ ИЯУ МБИР

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

Результаты расчета переходного процесса с внешним кусочно-линейным возмущением по реактивности порядка  $0,3 \cdot \beta_{\text{эфф}}$  за первые 10 секунд, спадающим до 0 к двадцатой секунде представлены на рисунках 5 и 6.

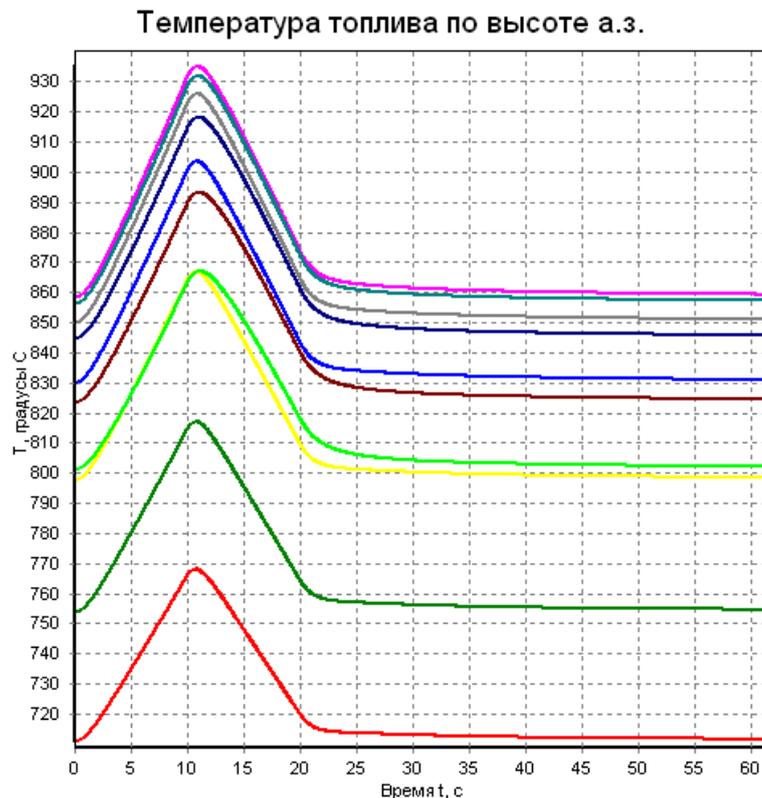


Рис. 5. График температуры топлива на различных участках активной зоны по высоте

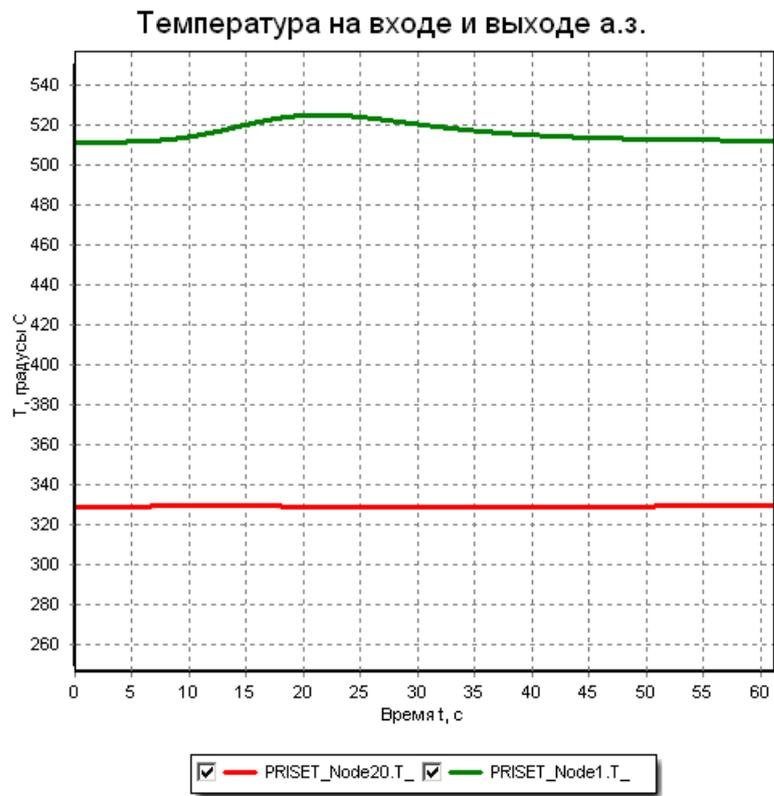


Рис. 6. График температуры натриевого теплоносителя на входе и выходе активной зоны

Результаты расчета переходного процесса с переходом с 300-ой до 600-ой секунды с одного уровня мощности на другой и возвратом с 1000-ой до 1300-ой секунды представлены на рисунке 7.

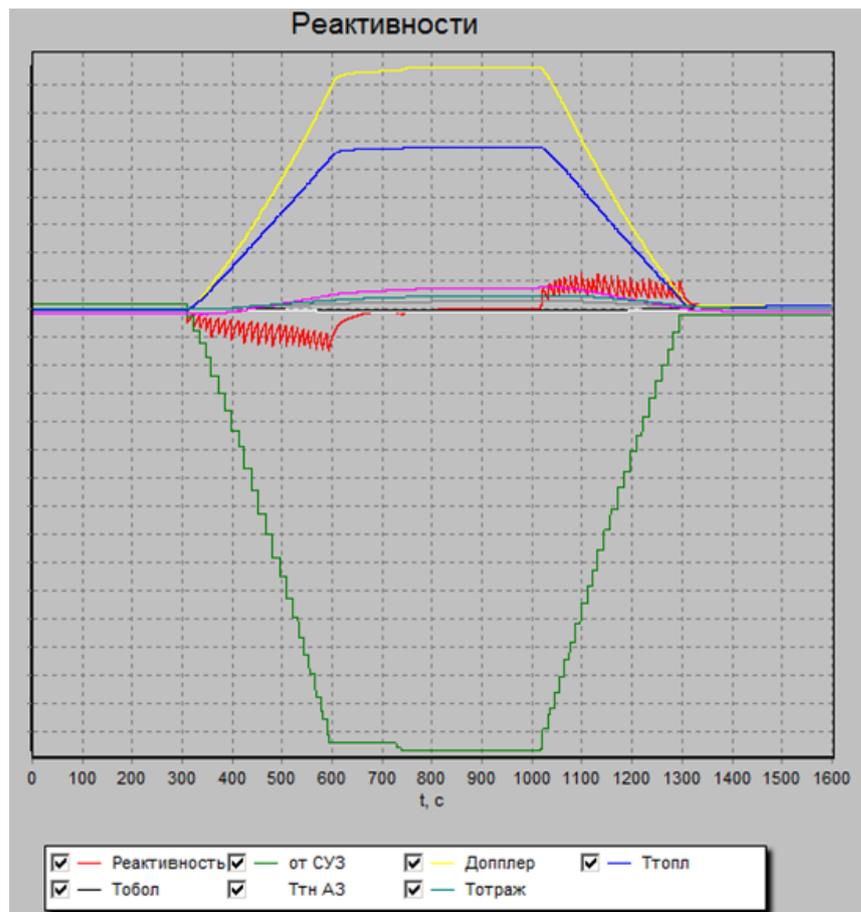


Рис. 7. График изменения реактивности при переходах с одного уровня мощности на другой

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В рамках настоящей работы расчетный код PRASET интегрирован 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 реакторной установки 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 реакторной установки.

Практическая значимость разработанной комплексной модели динамики заключается в возможности её 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 с целью обеспечения выполнения требований технического задания на проект. При необходимости на этом этапе модель и сам расчетный код могут быть скорректированы и уточнены за счёт 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 тренажёра [13] 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 реакторной установки и для проверки работы АСУ ТП в её составе.

### ***Литература***

1. Козлов О.С., Тимофеев К.А., Ходаковский В.В. и др. Программный комплекс для исследования динамики и проектирования технических систем. –М.: *Информационные технологии*, № 9, 2005.
2. Колесов Ю.Б. *Объектно-ориентированное моделирование сложных динамических систем*, –СПб.: *Издательство СПбГПУ*, 2004.
3. Ходаковский В.В. Разработка математического и программного обеспечения расчётов динамики систем управления, элементов реакторных и других установок. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. –М.: *Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2000.

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. –М.: ВАНТ. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. Вып.33. Исследовательские реакторы, 2013.
5. *Паршиков И.А., Петухов В.Н. и др.* Программный комплекс SimInTech для моделирования сложных технических систем. –СПб.: Труды международной научно-технической конференции «Компьютерное моделирование 2013, Издательство СПбГПУ, 2013.
6. *Паршиков И.А., Щекатуров А.М. и др.* Модельно-ориентированное проектирование в SimInTech. –г. Нижний Новгород.: Атомный проект, №15, 2015.
7. *Parshikov I, Shchekaturov A.* Simulation of nuclear power plant with heavy liquid metal-cooled reactor in SimInTech. –St. Petersburg.: Humanities & Science University Journal, 2013.
8. *Щекатуров А.М., Тимофеев К.А., Паршиков И.А. и др.* Создание комплексной модели динамики реакторной установки с жидкометаллическим теплоносителем с использованием среды разработки SimInTech. –СПб.: Труды международной научно-технической конференции «Компьютерное моделирование 2013», Издательство СПбГПУ, 2013.
9. *Паршиков И.А., Щекатуров А.М. и др.* Разработка и применение комплексной динамической модели реакторной установки СВБР-100 для проектирования опытно-промышленного энергоблока. –Обнинск.: Сборник трудов конференции «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях» (ТЖМТ–2013), Том 1, 2013.
10. *Паршиков И.А., Щекатуров А.М. и др.* Программное обеспечение SimInTech для программирования приборов систем управления. –М.: Атомная энергия, Том 113, Вып. 6, 2012.
11. *Щекатуров А.М., Паршиков И.А. и др.* Концепция модельно-ориентированного проектирования АЭС с использованием программного комплекса SimInTech. –Обнинск.: Сборник трудов научно-технической конференции «Теплофизика реакторов на быстрых нейтронах» (Теплофизика -2012), 2012.
12. *Паршиков И.А., Баум Ф.И., Щекатуров А.М. и др.* Разработка АСУ ТП в SimInTech. –СПб.: Труды международной научно-технической конференции «Компьютерное моделирование 2014», Издательство СПбГПУ, 2013.
13. *Козлов О.С., Паршиков И.А. и др.* Возможности среды моделирования SimInTech для создания корабельных тренажеров. –СПб.: Труды научно-технического семинара «Разработка и использование корабельных тренажеров. Технологии их создания», Издательство НИТИ им. А.П. Александрова, 2013.

#### **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