

ТЕРМИТ – ТЕХНОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ МОДЕЛИРУЮЩИХ СИСТЕМ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ МАЛОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Лялюев Д.В., Шаленинов А.А.

(ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», Сосновый Бор, Россия)

Введение

Современными средствами решения различных инженерных и эксплуатационных задач, требующих анализа динамических режимов, происходящих на объектах использования ядерной энергии (ОИЯЭ), являются комплексные модели-анализаторы (инженерные симуляторы), детально моделирующие совокупность нестационарных нейтронно-физических и теплофизических процессов, а также процессы, происходящие в аппаратуре систем управления и системах выработки и передачи электроэнергии.

В соответствии с ГОСТ Р 57700.21: «Связанная совокупность компьютерных моделей различных видов, описывающих с требуемым уровнем адекватности свойства и поведение экземпляра изделия, изменение его характеристик и внутренние процессы в зависимости от состояния внешней среды (управляющих воздействий), решаемых задач и условий их выполнения» определяется как **цифровой двойник изделия**.

Из определения следует, что цифровыми двойниками могут считаться моделирующие системы, основу которых составляют комплексные (полномасштабные) расчетные модели ОИАЭ, например, тренажеры (с полномасштабными моделями реального времени), анализаторы, а также, так называемые, «виртуальные энергоблоки» и «виртуальные ЯЭУ», активно разрабатываемые и внедряемые в атомной отрасли в последние 15 лет.

Цифровые двойники объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) разрабатываются для решения различных задач:

- комплексное (полномасштабное) моделирование технологических процессов в течение всего жизненного цикла изделия для проверки проектных решений, заложенных в ОИЯЭ, и возможных направлений его модернизации;
- расчеты в обоснование безопасности ОИЯЭ;
- моделирование сценариев развития аварийных ситуаций для разработки мероприятий по управлению авариями в целях их предотвращения или локализации;
- использование в качестве основы создания полномасштабных и аналитических тренажеров для обучения и лицензирования оперативного персонала при условии выполнения моделью требования проведения расчетов в реальном масштабе времени на соответствующем классе вычислительной техники;
- отработка алгоритмов управления оборудованием и технологическими системами ОИЯЭ на ранней стадии проектирования АСУ ТП;
- отработка и валидация человеко-машинного интерфейса (СВБУ, пульта управления) АСУ ТП для обоснования функций оперативного персонала, оптимизации эргономики рабочих мест и проведения эргономической экспертизы;
- отработка и испытания штатного программного обеспечения и аппаратуры АСУ ТП на испытательном полигоне с использованием комплексной модели реального времени в качестве модели объекта управления для минимизации сроков и трудоемкости работ по пуско-наладке АСУ ТП на объекте;
- отработка и валидация алгоритмов диагностирования и испытание систем диагностирования до постановки на объект с использованием комплексной модели реального времени в качестве модели объекта диагностирования;
- расчетная поддержка пуско-наладочных работ;

– использование в качестве демонстрационного комплекса для формирования положительного общественного мнения по отношению к применению ОИЯЭ.

60-летний опыт НИТИ в численном моделировании ОИАЭ позволяет сформулировать следующие главные требования к разработке комплексных расчетных моделей (КРМ) для цифровых двойников:

- **Полномасштабность.** Объем моделирования КРМ должен включать все технологические системы и оборудование, подлежащее автоматизации управления проектом АСУТП. Моделированию подлежит вся совокупность сигналов, циркулирующих в системах управления.

- **Всережимность.** КРМ цифрового двойника ОИЯЭ должна обладать свойством всережимности, т.е. способностью воспроизводить любые переходные эксплуатационные режимы, в том числе и аварийные, без перекомпоновки расчетных схем моделей технологических систем, от холодного состояния до расхолаженного с учетом задания любых исходных событий из детерминированного перечня проектных и запроектных аварий, рассматриваемых в ТОБ и ВАБ.

- **Проведение расчетов динамики объекта моделирования в масштабе времени близком к реальному.** Для удобства проведения массовых и многовариантных расчетов необходимо, чтобы моделирование нестационарных физических процессов, происходящих в ОИЯЭ, производилось в масштабе времени близком к реальному (для тренажеров строго в реальном времени) на доступных вычислительных средствах, не требующих высококвалифицированного и дорогого обслуживания. Это предъявляет повышенные требования к разрабатываемым программным средствам с точки зрения максимальной эффективности реализованных в них вычислительных алгоритмов.

- **Верифицированность.** Экспериментальные данные, полученные после ввода в эксплуатацию ОИЯЭ, это главный критерий соответствия цифрового двойника объекту исследования и основная информация по направлениям его постоянного совершенствования на всем жизненном цикле цифрового двойника. До ввода в эксплуатацию объекта моделирования расчетные коды, используемые для создания цифрового двойника, должны быть верифицированы по экспериментальным данным, полученных на объектах аналогах.

- Цифровые двойники, разрабатываемые для исследования динамики ОИАЭ, в части моделирования основных систем реакторных установок должны быть основаны на расчетных кодах, удовлетворяющим требованиям, предъявляемым к программным средствам для обоснования безопасности РУ.

Применение технологии *ТЕРМИТ* в разработке цифровых двойников

Для создания цифровых двойников (моделирующих комплексов и тренажеров) различных объектов использования атомной энергии ведущими в данной области зарубежными и отечественными фирмами разработаны и применяются так называемые технологии (системы) автоматизации моделирования. Эти технологии в максимальной степени (до 100%) автоматизируют процесс создания программного обеспечения, исключая собственно сам процесс кодирования, этим существенно ускоряя разработку прикладного ПО и повышая качество создаваемых программно-технических комплексов. По существу, с помощью технологий автоматизации процесс разработки, создания и сопровождения тренажеров и моделирующих комплексов поставлен на промышленную основу.

Одной из подобных систем является программный комплекс ***ТЕРМИТ*** (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013661824), разработанный во ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» во второй половине 1990-х

годов и отмеченный дипломом первой степени и золотыми медалями международной выставки «Тренажерные технологии» в ВВЦ, г. Москва, декабрь 1999 г. [1–3].

ТЕРМИТ – это интегрированная, графическая, многопользовательская и многоплатформенная (ОС ASTRA Linux, Windows, Open VMS) *среда моделирования*, имеющая в своем составе широкий набор инструментальных программных средств: расчетных кодов и пакетов программ моделирования, векторных графических редакторов для создания расчетных, функциональных схем и информационных моделей (видеокадров), средств интеграции с различными кодами и программными комплексами.

ТЕРМИТ поддерживает все фазы разработки моделирующей системы: сбор и хранение данных, кодирование, тестирование, интеграцию, валидацию, сопровождение, модернизацию и выпуск документации по проекту.

С использованием программно-инструментальных средств системы **ТЕРМИТ** разработано более 25 тренажеров и расчетно-моделирующих комплексов (РМК) для различных объектов использования атомной энергии: исследовательских реакторов, наземных стендов-прототипов ЯЭУ, судовых, корабельных, космических ЯЭУ и энергоблока АЭС.



Модернизированный (2022г.) полномасштабный тренажер первой в мире плавучей атомной теплоэлектростанции «Академик Ломоносов» на базе ПЭБ проекта 20870

ТЕРМИТ постоянно развивается с учетом решения новых задач, поставленных перед институтом. В настоящее время происходит очередная глубокая модернизация программного комплекса **ТЕРМИТ**, основными направлениями которой в части системного программного обеспечения (СПО) являются:

- разработка кроссплатформенной версии СПО **ТЕРМИТ** для решения задач импортозамещения и информационной безопасности посредством реализации клиентских частей СПО ТЕРМИТ в среде ОС ASTRA Linux при сохранении возможности работы в ОС Windows;

- замена СУБД Oracle, используемой в составе СПО **ТЕРМИТ**, на защищенную реляционную СУБД PostgreSQL, с сохранением возможности использования СУБД Oracle;

- совершенствование имеющихся и разработка новых инструментальных программных средств: векторных графических редакторов для расчетных и функциональных схем, средств оптимизации выполнения ряда функций, предназначенных для повышения производительности труда пользователей, доработка имеющихся и создание новых средств расширения, сопровождения и интеграции ПК **ТЕРМИТ** с различными программными комплексами, в том числе сторонних организаций.

В части функционального программного обеспечения (ФПО) модернизация ПК **ТЕРМИТ** ведется в направлении создания новых кроссплатформенных версий расчетных кодов (РК), соответствующих обновленному функционалу СПО ПК **ТЕРМИТ**. А именно:

- разработка версии 3.0 РК SELEN для моделирования нестационарных физических процессов в электрических сетях постоянного и переменного тока произвольной топологии и составом оборудования, расширение области применения и функциональных возможностей кода по сравнению с предыдущей версией SELEN 2.0;

- разработка версии 2.0 расчетного кода ПРАГИС для моделирования нестационарных теплогидравлических процессов в трубопроводных системах произвольной топологии с однофазным теплоносителем (вода, масло, жидкие металлы, газы) в несжимаемом приближении с расширением области применения кода по сравнению с предыдущей версией;

- разработка версии 2.0 расчетного кода АРТЕК для моделирования нестационарных теплогидравлических процессов в трубопроводных системах произвольной топологии с двухфазным теплоносителем (вода и парогазовая фаза) с учетом термической неравновесности фаз и с расширением функциональных возможностей кода по сравнению с предыдущей версией;

- разработка универсальной версии расчетного кода КРАБ 2.0 для моделирования нестационарных теплогидравлических процессов в трубопроводных системах произвольной топологии с многофазным теплоносителем (вода, пар, газы) в приближении двухфазного трехкомпонентного термически неравновесного потока со скольжением фаз и расширение области применения по сравнению с предыдущей версией РК КРАБ (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021669757);

- доработка нового расчетного кода SIGNET для моделирования нестационарных газодинамических процессов в трубопроводных системах произвольной топологии с теплоносителем в виде сжимаемого двухкомпонентного газа.

ТЕРМИТ содержит также в составе прикладного ПО пакет программ АКУЛА для моделирования регуляторов и логики систем контроля и управления и набор графических редакторов для разработки информационных моделей (InGred, ГРИМ, DIV, МФГР).

Важнейшим преимуществом ПК **ТЕРМИТ**, по сравнению с аналогичными системами автоматизированной разработки комплексных (полномасштабных) моделей динамики ЯЭУ и АЭС, является интеграция в его состав системного кода улучшенной оценки **КОРСАР**, аттестованного Ростехнадзором РФ для расчетов, выполняемых в обоснование безопасности судовых водо-водяных реакторных установок и реакторных установок для АЭС с РУ ВВЭР [4]. Это позволяет создавать инженерные анализаторы для проведения расчетов в обоснование безопасности ОИЯЭ

оптимального быстродействия, где сочетается точность модели РУ по аттестованному коду и полномасштабность моделирования в объеме всего энергоблока с использованием эффективных кодов реального времени.

Общая особенность перечисленных выше кодов и пакетов моделирования в составе ПК **ТЕРМИТ** – гибкая топология и наличие графического интерфейса пользователя, позволяющего создавать модели сетей любой топологии с минимальными временными затратами.

Необходимость использования для моделирования теплогидрогазодинамических процессов при разработке КРМ нескольких расчетных кодов (КРАБ, АРТЕК, ПРАГИС, SIGNET, **КОРСАР**) разной степени сложности и области применения обусловлено наличием в составе АЭС и ЯЭУ большого количества трубопроводных систем, отличающихся типом, параметрами и свойствам теплоносителей, а также характером протекающих в них нестационарных физических процессов. Использование «тяжелых» расчетных кодов только для моделирования основных систем РУ позволяет создавать быстродействующие КРМ оптимальные с точки зрения использования ресурсов вычислительной техники и точности моделирования. Это важно для удовлетворения требования проведения расчетов в реальном масштабе времени (тренажеры и РМК для полигонной отработки и испытаний АСУ ТП) или близкому к реальному для проведения многовариантных расчетов с помощью инженерных моделей в обоснование безопасности РУ и энергоблоков.

Расширение функционала цифровых двойников в область виртуализации и дополненной реальности

Представленные выше цифровые двойники в основном описывают динамическое поведение объекта математического моделирования (экземпляра изделия) и изменение его параметров и внутренних процессов в зависимости от состояния внешней среды, управляющих воздействий на изделие и режимов его работы.

В последние 2-3 года в НИТИ начаты работы по созданию моделей виртуальной реальности с целью соединения этой «новой реальности» с комплексными математическими моделями динамики ОИЯЭ. За это время проведено изучение проблематики, отобрано, закуплено и освоено необходимое ПО для создания 3D-информационных моделей и виртуализации, спроектирован, разработан, отлажен и представлен рабочий демонстрационный макет реализованной технологии в следующем составе:

- На основе технологии информационного моделирования (3D) с использованием отечественного ПО фирмы АСКОН в связке программных продуктов «Компас 3D» – «Renga» – «Pilot-BIM» по данным проектной документации и/или полученного при помощи технологии лазерного сканирования «облака точек» разрабатывается BIM-модель здания (энергоблока), в котором расположено технологическое оборудование ОИЯЭ. BIM-модель включает в себя как архитектурную, так и технологическую часть.

- Отработанная BIM-модель выгружается из среды Pilot-BIM в формате IFC и загружается с использованием плагина «Datasmith CAD Importer» в среду разработки систем виртуальной реальности – Unreal Engine версии 5, где производится обработка данных, доработка и получение модели виртуальной реальности объекта моделирования. Unreal Engine – это кроссплатформенный игровой движок с открытым исходным кодом;

- С помощью разработанного специального клиентского ПО производится настройка связи модели системы виртуальной реальности с разработанной Базой Данных по технологическому оборудованию ОИЯЭ (БД «Ресурс, ремонт

и техобслуживание») и с комплексной расчетной моделью динамики реального времени (тренажер) этого же ОИЯЭ;

– С помощью VR-аппаратуры (VR-шлем/VR-очки и VR-контроллеры для управления) пользователь погружается в среду виртуальной реальности, получая возможность перемещаться по помещениям ОИЯЭ, изучать расположение и состав технологического оборудования, вызывать по нажатию на изображение нужного объекта информацию по данному оборудованию из Базы Данных, а также управлять оборудованием, имитируя технологический процесс управления «по месту» с обработкой управляющих сигналов в модели тренажера.

Следует подчеркнуть нашу исходную ориентацию на использование отечественного ПО или программного обеспечения с открытым исходным кодом или свободно распространяемого ПО.

Представленная технология позволяет существенно расширить функционал цифровых двойников ОИЯЭ, добавляя новые возможности в части повышения качества проектной проработки до начала строительства и далее на всем жизненном цикле изделия, а также предлагая новые возможности в части повышения качества обучения персонала. Представленный выше новый функционал системы **ТЕРМИТ** в части виртуализации позволяет превратить цифровой двойник действительно в «виртуальный энергоблок» или «виртуальную АЭС».

Актуальность использования данной технологии со временем будет повышаться, а стоимость реализации подобных цифровых двойников снижаться по мере повышения уровня цифровизации бизнес-процессов проектных и конструкторских организаций, занимающихся созданием объектов использования ядерной энергии, т.к. организация разработчик (или интегратор) цифрового двойника «виртуального энергоблока» сможет использовать готовые BIM-модели объектов капитального строительства и 3D-модели технологического оборудования и интегрировать их с комплексной расчетной моделью динамики энергоблока.

Заключение

Технология автоматизации моделирования **ТЕРМИТ** постоянно развивается и активно используется по следующим направлениям деятельности предприятия:

- расчетные исследования нестационарных физических процессов, происходящих на наземных стендах-прототипах ЯЭУ на всем их жизненном цикле и расчетная поддержка проведения обработки и испытаний перспективных ЯЭУ;
- разработка полномасштабных и функциональных тренажеров в целях обучения и лицензирования оперативного персонала ОИЯЭ;
- разработка, изготовление и поставка комплексных систем управления для ОИЯЭ в части обработки КСУ с использованием модели объекта автоматизации.

Применение нового функционала технологии **ТЕРМИТ** позволяет найти новые возможности повышения безопасности эксплуатации и улучшения экономических показателей использования по назначению на всем жизненном цикле ОИЯЭ.

Список литературы

1. Д.В. Лялюев, А.А. Шаленинов. Система автоматизации разработки и сопровождения функционального и специального программного обеспечения тренажеров и анализаторов ЯЭУ – ТЕРМИТ-Д. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1999, вып.2, с.130-146.
2. D.V. Lyalyuev, V.A. Vasilenko, A.A. Shaleninov. TERMIT CAD tools for development and maintenance of software for NPP simulators and analyzers. Proc. Annual Meeting of Nuclear Technology '2000, Bonn, Germany, pp. 427–430.

3. Д.В. Лялюев. Технология автоматизации моделирования ТЕРМИТ – инструментальная графическая среда для разработки цифровых двойников, тренажерных и моделирующих комплексов ядерных энергетических установок и энергоблоков АЭС. "Атомная энергия", Том 132, вып.2, февраль 2022, стр.93–99.
4. Р.Д. Филин, Ю.А. Мигров и др. Программный комплекс КОРСАР/VR для расчетов в обоснование безопасности реакторов блочной и интегральной компоновки и реакторов типа ВВЭР. «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок». 2015. № 2 (2).