

там оборудования и большим нагревом, вызывающим высокие температурные напряжения в толстостенных элементах ее оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамов Е.О., Мартынов П.Н., Рачков В.И., Сорокин А.П. К вопросу о выборе теплоносителя ЯЭУ естественной безопасности. — Изв. Российской академии наук. Энергетика, 2015, № 6, с. 3—14.
2. Митенков Ф.М. Перспективы развития быстрых реакторов-размножителей. — Атомная энергия, 2002, т. 92, вып. 6, с. 423—432.
3. Нестеров Ю.В., Лисянский А.С., Макарова Е.И. и др. Тепловая схема и оборудование II контура энергоблока АЭС с реакторной установкой БРЕСТ-ОД-300

для докритических параметров пара. — Теплоэнергетика, 2011, № 6, с. 32—36.

4. Сухоруков Ю.Г., Балунов Б.Ф., Лемехов В.В. и др. Теплогидравлические испытания модели смешивающего подогревателя высокого давления. — Там же, 2021, № 12, с. 68—75.
5. Попов А.В., Кулаков Е.Н., Проухин А.В. и др. Разработка технических решений по повышению надежности конденсатно-питательного тракта энергоблока БРЕСТ-ОД-300. — Электрические станции, 2023, № 4, с. 16—22.
6. Кулаков Е.Н., Попов А.В., Кругликов П.А. Оптимизация параметров системы поддержания температуры воды на входе парогенератора энергоблока с реактором БРЕСТ-ОД-300. — Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок, 2021, № 3(25), с. 23—35.

Поступила в Редакцию 23.11.23

УДК 621.039.5.001.2:658.5-52

ТЕРМИТ — ТЕХНОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ МОДЕЛИРУЮЩИХ СИСТЕМ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ МАЛОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Лялюев Д.В., Шаленинов А.А. (ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор)

e-mail: ldv@niti.ru

Работа посвящена развитию функционального наполнения технологии автоматизированной разработки цифровых двойников, моделирующих динамические свойства объектов малой ядерной энергетики в зависимости от состояния внешней среды, управляющих воздействий и отказов оборудования. Опыт НИТИ в численном моделировании динамики объектов использования атомной энергии позволяет сформулировать следующие главные требования к комплексным расчетным моделям, являющимся основой создания цифровых двойников:

полномасштабность — объем моделирования должен включать все технологические системы и оборудование, подлежащие автоматизации управления в соответствии с проектом АСУТП. Моделированию подлежит полная совокупность сигналов систем управления;

всережимность — расчетная модель должна обладать способностью воспроизводить любые переходные эксплуатационные режимы, в том числе и аварийные без перекомпоновки расчетных схем моделей технологических систем, от холодного до расхолаженного состояния с учетом задания любых исходных событий из детерминированного перечня проектных и запро-

ектных аварий, рассматриваемых на этапах технического обоснования безопасности и вероятностного анализа безопасности объектов использования атомной энергии;

проведение расчетов в масштабе, близком к реальному времени, на доступных вычислительных средствах, не требующих высококвалифицированного и дорогого обслуживания, для тренажеров и моделирующих систем отработки АСУТП — строго в реальном масштабе времени, что предъявляет повышенные требования к используемым расчетным кодам с точки зрения эффективности реализованных в них вычислительных алгоритмов и численных методов;

верифицированность — экспериментальные данные, полученные после ввода объекта в эксплуатацию, являются главным критерием соответствия цифрового двойника объекту (изделию) и основной информацией о направлениях его постоянного совершенствования на всем жизненном цикле. До ввода в эксплуатацию объекта моделирования расчетные коды, используемые для создания цифрового двойника, должны быть верифицированы по экспериментальным данным, полученным на объектах-аналогах.

Применение ТЕРМИТ в разработке цифровых двойников. Для создания цифровых двойников объектов использования атомной энергии разработаны и применяются системы, в максимальной степени (до 100%) автоматизирующие создание моделирующего программного обеспечения, исключая собственно сам процесс кодирования и тем самым существенно ускоряя разработку прикладного программного обеспечения, повышая качество моделирующих комплексов.

Одной из подобных является система ТЕРМИТ — 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 кодами и программными комплексами сторонних разработчиков [1—3].

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

С использованием программно-инструментальных средств системы ТЕРМИТ разработано более 25 тренажеров и расчетно-моделирующих комплексов для разных объектов использования атомной энергии: исследовательских реакторов, наземных стендов-прототипов ЯЭУ, судовых ЯЭУ и энергоблока АЭС (рис. 1).



Р и с. 1. Полномасштабный тренажер первой в мире плавучей атомной теплоэлектростанции «Академик Ломоносов» на базе плавучего энергоблока проекта 20870

ТЕРМИТ постоянно развивается с учетом новых задач, в настоящее время в части системного программного обеспечения по следующим направлениям:

- разработка кроссплатформенной версии системы для решения задач импортозамещения и информационной безопасности посредством реализации ее клиентских частей в среде ОС ASTRA Linux с сохранением возможности работы в ОС Windows;

- замена СУБД Oracle на защищенную реляционную СУБД PostgreSQL с сохранением возможности использования СУБД Oracle;

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

В части функционального программного обеспечения модернизация ТЕРМИТ проводится в направлении создания новых кроссплатформенных версий расчетных кодов, соответствующих обновленному функционалу системного программного обеспечения:

- разработка версии 3.0 расчетного кода SELEN для моделирования нестационарных физических процессов в электрических сетях постоянного и переменного тока произвольной топологии и состава оборудования, которая расширяет область применения и функциональные возможности кода по сравнению с предыдущей версией;

- разработка версии 2.0 расчетного кода ПРАГИС для моделирования нестационарных теплогидравлических процессов в трубопроводных системах произвольной топологии с однофазным теплоносителем 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 кода по сравнению с предыдущей версией;

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

Важным преимуществом ТЕРМИТ по сравнению с аналогичными системами автоматизированной разработки комплексных (полномасштабных) моделей динамики ЯЭУ и АЭС является интеграция с системным кодом улучшенной оценки КОРСАР, который аттестован для расчетов, выполняемых в обоснование безопасности судовых водо-водяных реакторных установок и реакторных установок для АЭС с ВВЭР [4]. Наличие в составе ТЕРМИТ кода КОРСАР позволяет создавать инженерные анализаторы для расчетов в обоснование безопасности объектов использования атомной энергии оптимального быстродействия, где сочетается точность компьютерной модели реакторной установки на базе аттестованного кода и полномасштабность моделирования всего энергоблока с помощью эффективных кодов реального времени.

Особенность перечисленных расчетных кодов в составе ТЕРМИТ — гибкая топология и наличие графического интерфейса пользователя, позволяющего создавать расчетные модели сетей любой топологии с минимальными временными затратами.

Необходимость использования для моделирования теплогидрогазодинамических процессов нескольких расчетных кодов разной степени сложности и области применения обусловлена наличием в составе АЭС и ЯЭУ большого количества трубопроводных систем, отличающихся типом, параметрами и свойствами теплоносителя,

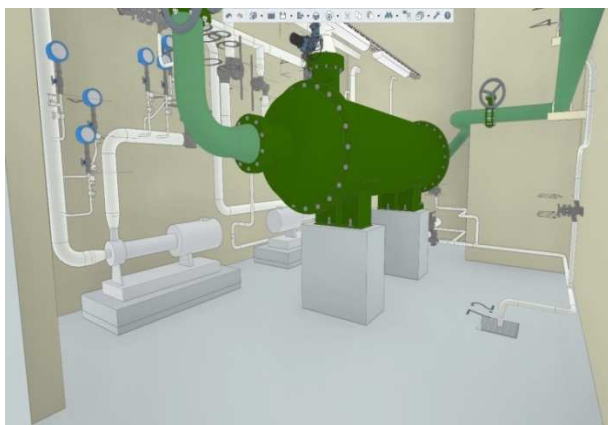
а также характером протекающих в них нестационарных физических процессов. Применение аттестованных расчетных кодов только для моделирования основных систем реакторных установок позволяет создавать быстродействующие модели энергоблоков, оптимальные с точки зрения ресурсов вычислительной техники и точности моделирования. Это важно при разработке систем реального времени (тренажеры и моделирующие комплексы для полигонной отработки и испытаний АСУ ТП) или для удобства многовариантных расчетов в обоснование безопасности установок в близком к реальному масштабу времени.

Расширение функционала цифровых двойников в область виртуальной и дополненной реальности. Представленные цифровые двойники отражают динамическое поведение объекта математического моделирования (экземпляра изделия) и изменение его параметров и внутренних процессов в зависимости от режима работы, состояния внешней среды, управляющих и аварийных воздействий на изделие.

В НИТИ ведутся работы по освоению технологии создания моделей виртуальной и дополненной реальности в целях соединения «новой реальности» с комплексными математическими моделями динамики объектов использования атомной энергии. Изучена проблематика, освоено программное обеспечение, необходимое для создания 3D-информационных моделей объектов использования атомной энергии и виртуализации, спроектирован, разработан, отлажен и представлен рабочий программно-технический макет для демонстрации разработанной технологии:

на основе технологии информационного моделирования с применением отечественного программного обеспечения фирмы АСКОН в связке программных продуктов Компас 3D — Renga — Pilot-BIM по данным проектной документации и/или полученного с помощью лазерного сканирования «облака точек» разрабатывается BIM-модель, включающая в себя как архитектурную, так и технологическую часть энергоблока (рис. 2);

отработанная BIM-модель выгружается из среды Pilot-BIM в универсальном формате IFC и загружается с использованием плагина Datasmith CAD Importer в среду разработки систем виртуальной реальности Unreal Engine вер-



Р и с. 2. Фрагмент BIM-модели помещения энергоблока

сии 5, где обрабатываются данные и разрабатывается модель виртуальной реальности объекта моделирования. Unreal Engine — это кроссплатформенный игровой движок с открытым исходным кодом;

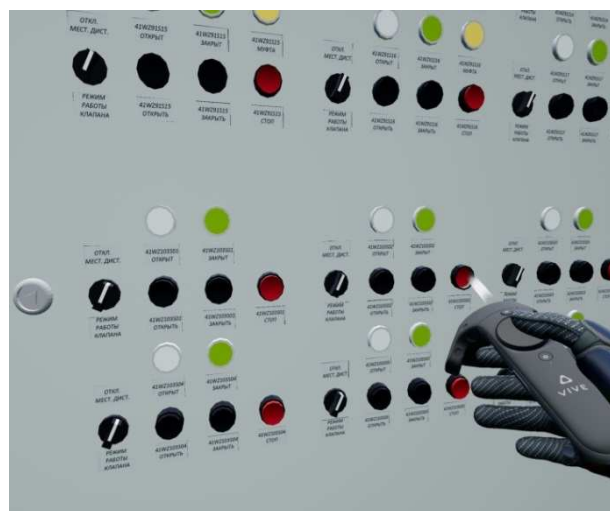
с помощью специально разработанного клиентского программного обеспечения проводится настройка связи модели системы виртуальной реальности с разработанной базой данных по технологическому оборудованию объекта (база данных «Ресурс, ремонт и техобслуживание») и комплексной расчетной динамической моделью реального времени (тренажер) этого же объекта;

с помощью VR-аппаратуры (VR-шлем/VR-очки и VR-контроллеры управления) пользователь погружается в среду виртуальной реальности, получая возможность перемещаться по помещениям объекта (энергоблока), 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 местного управления с отработкой управляющих сигналов в модели тренажера (рис. 3, 4).

Представленная технология разработана на основе отечественного программного обеспечения, программного обеспечения с открытым исходным кодом и свободно распространяемого программного обеспечения и позволяет существенно расширить функционал цифровых двойников, добавляя новые возможности в части повышения качества проектирования объектов использования атомной энергии до начала строительства и сопровождения на всем жизненном цикле. Данная технология может быть



Р и с. 3. Перемещение по помещениям энергоблока в системе виртуальной реальности



Р и с. 4. Реализация функции местного управления оборудованием в системе виртуальной реальности

применена для повышения качества обучения персонала в составе технических средств нового поколения.

Новый функционал ТЕРМИТ в части виртуализации позволяет превратить цифровой двойник в виртуальный энергоблок или виртуальную АЭС.

По мере повышения требований к лицензированию строительства объектов использования атомной энергии и уровня цифровизации бизнес-процессов проектных и конструкторских организаций и с переходом к работе в общей среде проектных данных актуальность использования рассмотренной технологии будет возрастать, в том числе и из-за уменьшения стоимости создания цифровых двойников подобного класса. Разработчик (интегратор) цифрового двойника сможет применять уже готовые BIM-модели объектов капитального строительства (от проектантов) и 3D-модели технологиче-

ского оборудования (от конструкторов) для разработки виртуальных моделей и интегрировать их с комплексными расчетными моделями динамики объектов использования атомной энергии.

Заключение. Развитие и применение нового функционала системы ТЕРМИТ позволяют найти новые возможности повышения безопасности эксплуатации и улучшения экономических показателей объектов использования атомной энергии на всем жизненном цикле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лялюев Д.В., Шаленинов А.А. 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. Lyalyuev D.V., Vasilenko V.A., Shaleninov A.A. THERMIT CAD tools for development and maintenance of software for NPP simulators and analyzers. — In: Proc. Ann. Meeting of Nuclear Technology'2000. Germany, p. 427—430.
3. Лялюев Д.В. Технология автоматизации моделирования ТЕРМИТ — инструментальная графическая среда для разработки цифровых двойников, тренажерных и моделирующих комплексов ядерных энергетических установок и энергоблоков АЭС. — Атомная энергия, 2022, т. 132, вып. 2, с. 93—99.
4. Филин Р.Д., Мигров Ю.А., Коротаев В.Г. и др. Программный комплекс КОРСАР/ВР для расчетов в обоснование безопасности реакторов блочной и интегральной компоновки и реакторов типа ВВЭР. — Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок, 2015, № 2(2), с. 6—14.

Поступила в Редакцию 16.02.24

УДК 621.039.338.2

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ

Федоровский А.Ю., Кириенко С.О., Сиполс А.А. (АО «Прорыв», г. Москва)

e-mail: fayuu@pnproryv.ru

Использование технологии цифровых двойников в проектом направлении «Прорыв» принесло значимые результаты, однако необходим дальнейший поиск возможного применения этих наработок и их совершенствования для получения качественно нового уровня взаимодействия виртуальных объектов с их реальными образцами для достижения существенных и системных эффектов.

Проектное направление «Прорыв» характеризуется высокой степенью новизны разрабатываемых технологий и разнородностью коллектива, выполняющего такие исследования, — отраслевые, академические и коммерческие организации, более 2000 технических специалистов. В таких условиях очевидно, что необходимы инструменты и подходы для интеграции разнородных информационных, расчетных и моделирующих средств. Для преодоления значительной неопределенности путей достижения конечных результатов вследствие большого объема НИОКР, результаты которых постоянно изменяются в проектах объектов, было разработано единое информационное пространство проектного направления «Прорыв», позволившее объединить в общей среде разных участни-

ков и обеспечившее их площадкой для совместной работы.

Для технической реализации единого информационного пространства был использован привычный для отрасли в 2011—2013 гг. набор программного обеспечения. На базе этого решения были сформированы набор информационных, 3D- и расчетных моделей в объектовой привязке и интегрирующие проекты первых объектов проектного направления. В результате разработки интегрирующих проектов были получены цифровые двойники объектов.

В проектом направлении «Прорыв» используется собственное определение цифрового двойника — это построенный в виртуальном пространстве объект с набором баз данных, моделей, инструментов визуализации в 3D, программных продуктов и получаемых в режиме реального времени данных, позволяющих моделировать работу и обслуживание объекта в нормальных условиях эксплуатации, а также при отклонении от них, включая проектные и запроектные аварии. Цифровой двойник служит для оптимизации проектных, конструкторских, технологических решений, создания тренажеров,