

УДК 004.942

**ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ
ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА РОССИЙСКИХ АСУ ТП АЭС**

ПАППЕ И.Н., ВОЛОДИН В.С.

*Акционерное общество «Русатом Автоматизированные системы управления»
(Москва, Российская Федерация)*

Аннотация. Современное развитие вычислительной техники и информационных технологий позволили отечественной атомной отрасли начать цифровую трансформацию. Это преобразование включает в себя не только рост уровня автоматизации бизнес-процессов и применения технологий индустрии 4.0, но и применение математического моделирования на разных этапах жизненного цикла разрабатываемых продуктов. В данном докладе авторы предпринимают попытку обобщить имеющийся опыт применения математического моделирования на различных стадиях жизненного цикла российских АСУ ТП АЭС и рассказать о ведущихся разработках в данной области.

Ключевые слова: математическое моделирование, АСУ ТП, АЭС, верификация, аналитический тренажёр.

**APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELS AT DIFFERENT STAGES OF THE LIFE
CYCLE OF RUSSIAN NPP I&C SYSTEM**

I.N. PAPPE, V.S. VOLODIN

*JSC «Rusatom Automated Control Systems»
(Moscow, Russian Federation)*

Abstract. The modern development of computers and information technologies has allowed the national nuclear industry to begin digital transformation. This transformation includes not only an increase in the level of business process automation and the use of Industry 4.0 technologies, but also the use of mathematical modeling at different stages of the product life cycle. In this report, authors attempt to summarize the existing experience of using mathematical modeling at various stages of the Russian NPP I&C system life cycle and talk about the ongoing developments in this area.

Keywords: mathematical modeling, I&C system, nuclear power plant, verification, analytical simulator.

Введение

Математическое моделирование является основой для современного решения инженерных задач, и его роль возрастает в связи с необходимостью решения все более сложных прикладных задач: прогнозирование развития технологического процесса, определение скрытых дефектов технологического оборудования и т.д.

В настоящее время для проектирования и ввода в эксплуатацию различных сложных технических систем (автомобили с автопилотом, робототехника, военная авиация, оборонные оружейные комплексы и т.д.) применяется модельно-ориентированное проектирование, в рамках которого на каждом этапе разработки системы вместо её физических прототипов используется соответствующая математическая модель для имитации. Этот подход позволяет в разы ускорить разработку технических систем, изготовление и тестирование которых либо требует больших финансовых ресурсов, либо требует соблюдения большого количества требований по безопасности. Энергоблоки АЭС представляют собой именно такую систему.

В атомной отрасли математическое моделирование применялось в основном для проверки конструкторских решений на этапе проектирования технологического оборудования (как, например, в [1]), обоснования безопасности эксплуатации энергоблоков АЭС и подготовки оперативного персонала. Однако развитие вычислительной техники и информационных технологий в последние десять лет позволило начать внедрение математического моделирования и на других стадиях жизненного цикла АСУ ТП АЭС (см. рис. 1, [2]) как на этапе пусконаладки энергоблоков, так и на этапе их промышленной эксплуатации.

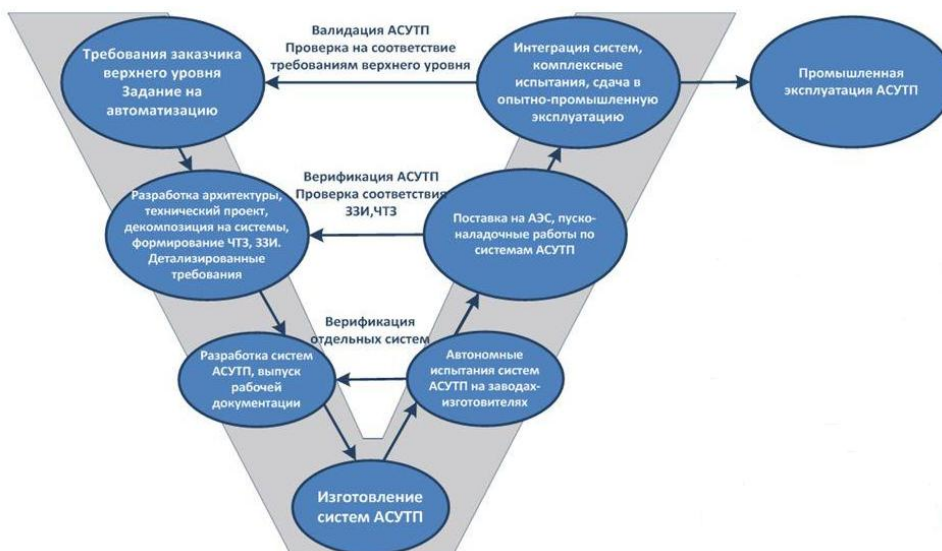


Рис. 1. Жизненный цикл АСУ ТП

Применение математического моделирования на этапе проектирования ЯЭУ

На этапе проектирования производятся расчеты с целью принятия и корректировки технических решений. На этом этапе проводится проверка работы оборудования не только в условиях нормальной эксплуатации, но и в условиях проектных и запроектных аварий: определяются эксплуатационные пределы и условия, пределы и условия безопасной эксплуатации энергоблока, а также последствия различных возможных аварий.

Так как оборудование реакторной установки, реакторного отделения (за исключением реактора), турбины и машинного зала (за исключением турбины), системы автоматики проектируется разными организациями, то, соответственно, используются и различные моделирующие комплексы для верификации проектных решений.

В настоящее время при проведении конструкторских нейтронно-физических расчетов активных зон реакторов сложился следующий подход, обусловленный, в частности, возможностями вычислительной техники. Расчет отдельных ТВС осуществляется по двумерным малогрупповым программам с созданием библиотек малогрупповых констант для последующего крупносеточного расчета. К программам данного класса относятся КАССЕТА, ШЕСТИГРАННИК, ТВС-М и ряд других. Расчет библиотек малогрупповых констант для крупносеточных расчетов выполняется по двумерным спектральным программам (например, WIMS-D4, САПФИР) или при совместном одновременном использовании спектральных и малогрупповых программ (УНИРАСОС или ТВЭГ + КАССЕТА или ТВС-М) [3].

При расчете трехмерной активной зоны, определяются поля энерговыделения, выбирается картограмма загрузки активной зоны, длительность топливной кампании и схема топливных перегрузок. Расчеты выполняются по стационарным программам с учетом обратных связей по теплогидродинамике. С помощью таких расчетов определяется применимость заложенных на первоначальной стадии проекта схем загрузки топлива, допустимая величина неравномерности поля энерговыделения, длительность топливной кампании. При проектировании активных зон ВВЭР для реализации соответствующего численного эксперимента используется программа БИПР-7(7А) [3].

Программы теплогидравлических расчетов ЯЭУ можно условно разделить на три группы: программы моделирования динамики ЯЭУ в условиях аварий, не связанных с крупными течами из первого контура (например, ДИНАМИКА, МОСТ-7); программы расчета процессов в ЯЭУ в условиях течей из первого контура ЯЭУ (например, КОРСАР, RELAP-5, ATHLET [19]); программы моделирования процессов в условиях протекания тяжелых аварий с разрушением активной зоны (например, СВЕЧА). Нестационарные теплогидравлические программы в настоящее время объединяются с трехмерными нестационарными нейтронно-физическими программами, образуя комплексы полномасштабного моделирования динамики реакторных установок [3].

Для комплексного исследования динамических процессов в ЯЭУ используются программы связанного нейтронно-физического и теплогидравлического расчета. Это программные комплексы, которые создавались путем объединения ранее разработанных программ гидродинамики и физики (программные комплексы ТИГР (БИПР8-KN +РАСНАР), АТНЛЕТ/БИПР8КН), либо программы, изначально предназначенные и разрабатываемые для связанного нейтронно-теплогидравлического расчета, например, «РАДУГА».

Для моделирования процессов в оборудовании машинного зала и системах водообмена первого контура применяются, как правило, теплогидравлические программы, имеющие возможность задания гибкой расчетной схемы и специально разработанные для моделирования сложных разветвленных теплогидравлических контуров. Например, программа TRP (Thermal Power Plant) или КРЭБ[3].

Также необходимо отметить разработку ОАО СПБАЭП «Виртуальный энергоблок АЭС с ВВЭР» (ПТК «ВЭБ»), пилотная версия которого создана на основе проекта ЛАЭС-2. Средствами ПТК «ВЭБ» созданы модели основного оборудования реакторной и паротурбинной установки, модели вспомогательных систем первого контура и систем управления, а также модели основных электротехнических систем. Для расчета теплогидравлических процессов в системах и оборудовании АЭС используются коды улучшенной оценки КОРСАР и РАТЕГ, а также одномерные гомогенные теплогидравлические коды [4]. В качестве управляющего программного комплекса используется ПК ТЕРМИТ, разработанный НИТИ [5]. Для локального моделирования, а также создания моделей мозаичных панелей используется ПТКУ SimInTech, разработки ООО «ЗВ Сервис». Создание и отображение видеокладов производится созданным в НИТИ специализированным модулем видеокладов, который позволяет конвертировать видеоклады из ПТК ПОРТАЛ [4].

Применение математического моделирования на этапе проектирования АСУ ТП АЭС

Для сокращения трудозатрат и повышения качества проектирования ПТК низовой автоматики АСУ ТП АЭС применяются соответствующие инструментально-моделирующие средства. В качестве инструмента верификации ПТК низовой автоматики, в основе которого лежат средства ТПТС, используют интегрированную среду (ИС) «ЭНИКАД» разработки ЭНИКО ТСО [6].

Моделирующие комплексы за авторством ЭНИКО ТСО и АО «ВНИИАЭС» в части АСУ ТП предназначены для использования в качестве электронной информационной модели АСУ ТП. Эта модель позволяет не только отображать все информационные связи в контуре «системы нижнего уровня АСУТП – СВБУ – электронные панели БПУ/РПУ», но и комплексно моделировать работу всех систем АСУТП в этом контуре с полной динамизацией (визуализацией) прохождения всех сигналов. Моделирование работы систем АСУ ТП в рамках комплексов может осуществляться в двух режимах:

а) в статическом режиме, без использования модели физических процессов (МФП) в технологических системах энергоблока, воспроизводящей показания всех датчиков АСУТП. В этом режиме показания датчиков задаются пользователем вручную, с помощью специализированной сервисной оболочки комплекса или в автоматическом режиме из специального, заранее подготовленного файла сценария;

б) в динамическом режиме, с использованием МФП, разрабатываемой в рамках отдельного. В этом режиме показания датчиков рассчитываются в МФП.

Модели разрабатываются с использованием ИС «ЭНИКАД» и платформы ПОРТАЛ (в части АРМ СВБУ программное обеспечение создано методом эмуляции, т.е. автоматизировано на основе штатного ПО СВБУ). Модель систем АСУ ТП в части низовой автоматики автоматизировано генерируется на основе STEP-кода, получаемого на инженерной станции ТПТС по GET-проекту и загружаемого в штатную аппаратуру ТПТС. Это позволяет в короткие сроки дополнить модель АСУ ТП нужными частями (функциональными областями GET-проекта).

Динамическое моделирование работы систем АСУ ТП с использованием МФП получило развитие в виде системы автоматизированного тестирования АСУ ТП для энергоблоков № 1 и 2 Ленинградской АЭС-2.

Применение математического моделирования на этапе пусконаладочных работ

В рамках цифровой трансформации отрасли преобразовывается и процесс пусконаладки энергоблоков АЭС с помощью математического моделирования: в московском филиале АО «Атомтехэнерго» с 2017 года ведётся разработка программного-технического моделирующего комплекса, создание которого позволит сократить время введения энергоблоков в эксплуатацию за счёт оптимизации пусконаладочных работ [7]

«Расчётно-аналитический экспериментальный комплекс» (РАЭК ПНР) – это цифровой инструментарий пусконаладочных работ. В основе лежит техническая составляющая, включая Супер-ЭВМ и комплект отечественных сертифицированных программных средств, расчетных кодов основных законодателей в области обоснования безопасности и проектирования (ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», ОКБ «Гидропресс», АО «АТОМПРОЕКТ», ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»). Ядром РАЭК ПНР, позволяющим осуществлять обмен данными между программными средствами, является программа динамического моделирования технических систем SimInTech разработки ООО «ЗВ Сервис».

Основная цель разработки РАЭК ПНР – создание цифрового инструментария для отработки и оптимизации пусконаладочных процедур в лабораторных условиях до начала работы специалистов АО «Атомтехэнерго» непосредственно на АЭС [8].

Применение математического моделирования на этапе промышленной эксплуатации

Одно из основных направлений цифровизации атомной отрасли – создание цифрового двойника энергоблока АЭС. Цифровой двойник – программный аналог физического устройства, моделирующий внутренние процессы, технические характеристики и поведение реального объекта в условиях воздействий помех и окружающей среды. Важной особенностью цифрового двойника является то, что для задания на него входных воздействий используется информация с датчиков реального устройства, работающего параллельно.

В 2009 г. стартовала разработка концепции «Виртуальной АЭС с ВВЭР». С 2015 г. началась активная стадия проекта с наименованием «Разработка программно-технического комплекса «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР». Основные исполнители работ: АО «ВНИИАЭС», ИБРАЭ РАН и РФЯЦ-ВНИИЭФ (разработчики СуперЭВМ).

Программно-технический комплекс «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» представляет собой совокупность расчетных кодов, позволяющих моделировать физические процессы, протекающие в технологическом оборудовании энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР, которая функционирует на высокопроизводительной вычислительной системе. Особенностью ПТК является наличие кодов тяжёлых аварий авторства ИБРАЭ РАН. Также в ПТК входят модели систем управления, созданные на основе ИС «ЭНИКАД».

ПТК позволяет без каких-либо последствий менять режим работы и прогнозировать изменения состояния оборудования, что, в свою очередь, позволяет сделать действующие АЭС более безопасными на всех стадиях жизненного цикла. Платформа программно-технического комплекса Виртуальной цифровой АЭС станет основной для разработки современных тренажеров оперативного персонала АЭС, что окажет позитивное влияние на качество подготовки персонала, и, как следствие, на уровень безопасности эксплуатации атомных станций.

Программно-технический комплекс «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» способен решать широкий спектр задач, включая верификацию проектных решений и расчетное обоснование безопасности. Пилотная версия разрабатывается для энергоблока №1 НВАЭС-2.

В 2017 году завершена разработка основных расчетных кодов, формирующих ядро программно-технического комплекса. Первая демонстрация программно-технического комплекса «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» состоялась 23 мая 2018 г. в АО «ВНИИАЭС» (дочернее общество АО «Концерн Росэнергоатом», входит в электроэнергетический дивизион Госкорпорации «Росатом») в рамках проведения 11-й Международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (МНТК-2018). В 2018 году завершена разработка последнего из модулей — модуля разрушения активной зоны. Кроме того, в 2018 г. завершены работы по интеграции отдельных программных модулей в состав программно-технического комплекса. К концу 2018 года были полностью завершены работы по монтажу и наладке технических средств. В конце 2019 г., после завершения работ по

верификации программно-технического комплекса и его опытной эксплуатации, проведены приемо-сдаточные работы. В 2019 году на программно-техническом комплексе Виртуально-цифровой АЭС прошло около 100 автономных и комплексных испытаний. Опытная эксплуатация ПТК подтвердила возможность его применения для проведения противоаварийных тренировок и комплексных противоаварийных учений, верификации алгоритмов управления энергоблоком АЭС, верификации противоаварийных инструкций и проектно-конструкторских решений наиболее ответственного оборудования. 3 марта 2020 года ПТК «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» принят в промышленную эксплуатацию. В дальнейшем планируется поэтапное внедрение программно-технического комплекса «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» в деятельность Кризисного центра АО «Концерн Росэнергоатом», его тиражирование на другие энергоблоки и решение прикладных задач, стоящих перед АО «Концерн Росэнергоатом» [9].

ПТК «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» разрабатывается в рамках энергетического дивизиона ГК Росатом. Также в дивизионе «АСУ ТП и электротехника» в рамках разработки системы информационной поддержки оператора (СИПО) для энергоблока № 1 НВАЭС-2 реализуется часть функционала цифрового двойника энергоблока. СИПО разрабатывается АО РАСУ и ИФ СНИИП АТОМ при поддержке оперативного персонала НВАЭС-2.

Согласно п. 3.4.5.1. НП-001-15, каждый энергоблок АЭС должен оснащаться системой информационной поддержки оператора [10]. Частью реализуемой СИПО является программно-технический комплекс «Модель энергоблока» (ПТК МЭ), включающий в себя, в частности, модели систем управления и физических процессов, протекающих в технологическом оборудовании блока.

Расчет распределения энерговыделения в объеме активной зоны выполняется аттестованной Ростехнадзором программой SVC, основанной на прямом решении уравнения переноса нейтронов и не использующей гомогенизацию расчетных ячеек и диффузионное приближение.

Теплогидравлическая модель основана на решении системы фундаментальных уравнений сохранения и замыкающих соотношений. В дополнение к системе главных уравнений, описывающих процессы тепломассопереноса в первом и втором контурах энергоблока, записывается уравнение переноса нерастворимых примесей для моделирования транспорта борного поглотителя в первом контуре реакторной установки.

Модель АСУ ТП реализована на базе отдельного программного модуля, обчитывающего логику работы модельных схем контроля и управления. Комплект расчётных схем формируется для неё с помощью редактора схем, который является составной частью программной среды КРУИЗ. Расчётные схемы формируются на основе GET-планов ТПТС, а также технического проекта АСУ ТП энергоблока и документации генерального конструктора РУ, поэтому модель АСУ ТП в целом повторяет логику, заложенную в АСУ ТП энергоблока.

Математическая модель привязана к сигналам СВБУ, что позволяет инициировать процесс моделирования с любого текущего состояния энергоблока. Также обеспечивается быстроедействие модели на уровне реального времени (возможно ускорение моделирования на порядок) [11].

В составе СИПО программная модель блока используется для реализации следующих функций:

- контроль достоверности показаний датчиков систем нормальной эксплуатации;
- мониторинг состояния основного оборудования энергоблока;
- контроль работы блочной автоматики (ТЗиБ, АВР и т.д.);
- прогнозирование развития технологического процесса с текущего состояния вперед на 15 – 30 минут с выдачей предупредительной сигнализации о выходе контролируемых параметров за эксплуатационные пределы при отсутствии управляющих воздействий оператора в заданном интервале времени (автоматический прогноз);
- прогнозирование развития технологического процесса с учетом сценария планируемых управляющих воздействий оператора в заданном интервале времени (запросный прогноз).

При прогнозировании моделируются процессы нормальной эксплуатации (НЭ), в том числе пуск блока от холодного состояния до работы на номинальных параметрах, разгрузка и

останов блока, маневрирование мощностью, а также процессы при нарушении нормальной эксплуатации (ННЭ), в том числе сопровождающиеся срабатыванием ПЗ и ускоренной разгрузкой блока [11].

Также стоит упомянуть проект, относящийся к технологии цифрового двойника энергоблока, финальная стадия которого началась в начале марта 2021 года: концерн «Росэнергоатом» совместно с АО «ВНИИАЭС» и компанией «Мейнтекс» приступили к завершающему этапу (опытная эксплуатация) реализации первого в России проекта по созданию и внедрению системы предиктивной аналитики в области атомной энергетики. Данная система реализуется на блоке № 1 Нововоронежской АЭС-2.

Проект направлен на создание прототипа системы, которая будет на ранней стадии обнаруживать скрытые дефекты в генерирующем оборудовании атомных станций. Уже разработаны и верифицированы модели машинного обучения нескольких видов оборудования – это турбогенератор, паротурбинная установка и циркуляционные насосы энергоблока №6 НВАЭС – они запущены для анализа актуального состояния оборудования в режиме реального времени

Внедрение на АЭС подобного решения позволит не только повысить безопасность и надежность работы российских АЭС, но и позволит уменьшить риски штрафов при неплановых остановах, а также сократить длительность простоев из-за ремонта и свести к минимуму количество нарушений и отказов в работе оборудования [12].

Данное решение является частью нового разрабатываемого продукта – «Шаблон эксплуатации», представляющий собой комплекс интегрированных цифровых систем, с помощью которых функционируют базовые бизнес-процессы – управление эксплуатацией (от сооружения до вывода из эксплуатации), персоналом, взаимодействием эксплуатирующей организации с сетевым оператором и т. д. «Шаблон эксплуатации» дополнит цифровые системы, обслуживающие хозяйственную деятельность АЭС – заключение договоров, закупки, движение денежных средств, — которые были внедрены примерно два года назад [13].

Заключение

В настоящее время осуществляется внедрение как полномасштабных моделей энергоблока, так и моделей машинного обучения на этапах пусконаладки и промышленной эксплуатации. Подобное стало возможно за счёт развития вычислительной техники и информационных технологий. Использование таких моделей позволит повысить эффективность процесса выработки электроэнергии на энергоблоках АЭС, в частности, за счёт прогноза развития технологического процесса и определения скрытых дефектов технологического оборудования.

Список литературы

1. R V Bahdanovich et al. Modeling of BN-600 Hybrid Core Benchmark (HEX-Z) with MCU-PTR and SERPENT 2. 2020 *J. Phys.: Conf. Ser.* 1689 012046
2. Кабачников А.Б., Морозов А.В. Подходы к технологии электронного проектирования АСУ ТП АЭС на базе пакета SmartPlant Enterprise // *Ядерная физика и инжиниринг.* – 2012. - № 2 (том 3). – С. 167-172.
3. Кавун О.Ю. САПР отрасли. Программы и программные комплексы, применяемые при конструировании ЯЭУ. Примеры применения и верификации конечно-разностных схем при разработке программ. Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 109 с.
4. Безлепкин В.В., Кухтевич В.О., Образцов Е.П. и др. Программно-технический комплекс «Виртуальный энергоблок АЭС с ВВЭР» (ПТК «ВЭБ») для проверки проектных решений АЭС-2006. Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР, 2013, сборник трудов 8-й международной научно-технической конференции, ОКБ «ГИДРОПРЕСС», г. Подольск, Россия.
5. Иконникова О.А., Калинин Д.В., Крицак С.В. и др. Модернизация и развитие системной оболочки программного комплекса ТЕРМИТ // *Технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ.* – 2016. – № 3 (5). – С. 48-55.
6. Зятников А.Н., Рогов В.М. Развитие методов верификации прикладного программного обеспечения АСУ ТП АЭС на базе ТПТС. Доклады БГУИР. 2015; 2 (88): 56-60.

7. Пусконаладка по-цифровому [Электронный ресурс] // РЭА. Ежемесячный журнал атомной энергетики в России #11 2018 [сайт]. URL: https://www.rosenergoatom.ru/zhurnalistam/zhurnal-rosenergoatom/?PAGEN_1=2.
8. Цифровизация производственных задач в АО «Атомтехэнерго» [Электронный ресурс] // АО «Атомтехэнерго» [сайт]. URL: <https://atech.ru/news/tsifrovizatsiya-proizvodstvennykh-zadach-v-ao-atomtekhenego/>.
9. Программно-технический комплекс «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» [Электронный ресурс] // Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук [сайт]. URL: <http://www.ibrae.ac.ru/contents/362>.
10. НП-001-15 Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. М.: Ростехнадзор, 2015.
11. Стацуря Д.Б., Тучков М.Ю., Поваров П.В. и др. Использование программной модели блока для совершенствования проектных решений и оптимизации управления технологическим процессом // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2020. – № 4. – С. 37-49.
12. Росэнергоатом: Первый в России проект по внедрению на АЭС системы предиктивной аналитики вышел на финишную прямую [Электронный ресурс] // АО «Концерн Росэнергоатом» [сайт]. URL: <https://www.rosenergoatom.ru/zhurnalistam/news/37790/>.
13. «Росэнергоатом» разрабатывает цифровые платформы и инструменты для АЭС [Электронный ресурс] // Инновации Росатома [сайт]. URL: <http://www.innov-rosatom.ru/news/detail/1376/>.