

ПАКЕТ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЯДЕРНО- ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ: ОБЗОР ФУНКЦИОНАЛА И ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ

А.А. Андрианов*, И.С. Купцов*, Т.А. Осипова*, А.А. Спиридонова*,
О.Н. Андрианова**, Т.В. Утянская**

* ИАТЭ НИЯУ МИФИ

249039, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, 1

**Независимый эксперт



Приводится краткое описание функциональных возможностей пакета прикладных программ моделирования ядерно-энергетических систем (ППМ ЯЭС), включая список объектов моделирования, ключевые приближения, области применения. ППМ ЯЭС состоит из следующих основных модулей: NUDAPS (подготовка одногрупповых нейтронных сечений, усредненных по стандартизированным и/или задаваемым пользователем спектрам нейтронов), NUCLEX (инструмент расчета эволюции нуклидного состава и характеристик ядерного топлива в реакторах и во внешней части топливного цикла), NUCAB (корректировка изотопного состава топлива и нейтронного потока в случае необходимости расчетного описания работы реактора на новом изотопном составе ядерного топлива), FANES (оценка материальных потоков и потребностей в услугах топливного цикла в сценариях развития ядерной энергетики), ECNES (оценка показателей экономической эффективности сценария развития ядерной энергетики). Каждый из модулей представляет собой самостоятельное расчетное средство, которое может использоваться независимо, а может быть интегрировано в состав программных средств технико-экономического моделирования ядерно-энергетических систем. В каждом модуле реализованы различные расчетные модели, что позволяет проводить оценку методической составляющей неопределённости расчета в задачах системного моделирования, и функционал оценки влияния неопределённости исходных данных на результирующие показатели. Приводится ряд примеров применения ППМ ЯЭС.

Ключевые слова: ядерно-энергетическая система, ядерный топливный цикл, динамическое моделирование, сценарный анализ, анализ материальных потоков, экономический анализ.

ВВЕДЕНИЕ

Программные средства для проведения технико-экономического моделирования ядерно-энергетических систем (ЯЭС) и сценарных (системных) исследований в области ядерного топливного цикла (ЯТЦ) позволяют оценивать изменение во времени объемов материальных потоков по переделам ЯТЦ, потребности в разнообразных услугах и

© А.А. Андрианов, И.С. Купцов, Т.А. Осипова, А.А. Спиридонова, О.Н. Андрианова,
Т.В. Утянская, 2022

товарах ЯТЦ, показатели эффективности и конкурентоспособности варианта ЯЭС с учетом многообразных внешних и внутренних факторов (под ЯЭС понимается система АЭС и связанные с этой системой предприятия ЯТЦ). Соответствующие расчетные модели могут конструироваться на уровне энергокомпании, страны, региона или даже всего мира и предполагают репрезентативное представление ключевых переделов сопряженного ЯТЦ и физических процессов, происходящих с ядерными материалами в процессе их циркуляции в топливном цикле ЯЭС [1 – 5].

Такие программные средства используются для комплексного анализа и технико-экономической оценки возможных вариантов развертывания ЯЭС, оптимизации вариантов ЯЭС по набору показателей эффективности с учетом ресурсных и инфраструктурных ограничений, сопоставления альтернативных вариантов ЯЭС, способов организации ЯТЦ, подходов к обращению с РАО и выбора из них наиболее приемлемых в данных условиях, исследования влияния технологических усовершенствований и новых разработок на показатели эффективности функционирования ЯЭС.

Соответствующие расчетные инструменты интегрируют в себе субмодели различных уровней: физические модели, позволяющие осуществить оценку изменения изотопного состава и характеристик ядерного топлива в реакторах и во внешней части ЯТЦ в процессе эволюции ЯЭС; модели динамики движения ядерных материалов в ЯТЦ; модели оценки показателей экономической эффективности ЯЭС; модели рынков АЭС, товаров и услуг ЯТЦ. Программные средства используются совместно со специализированными базами данных, содержащими информацию о текущем состоянии и предыстории развития ЯЭС на соответствующем уровне (глобальном, региональном, страновом, корпоративном), а также технико-экономические параметры действующих и запланированных к вводу реакторных установок и установок ЯТЦ.

Несмотря на существующий арсенал моделей, подходов, программных средств для системных исследований перспектив развития ядерной энергетики в настоящее время ведется планомерная работа по их дальнейшему развитию и совершенствованию с целью обеспечения возможности на их основе разработки технико-экономических моделей ЯЭС повышенной точности (корректное моделирование материальных потоков в ЯТЦ с учетом нуклидной кинетики, уточнение оценок экономических показателей и пр.), осуществляется внедрение в коды механизмов оптимизации и приоритизации прохождения технологических развилок, функционала анализа чувствительности (неопределенности), разведочного анализа данных, агрегирования общесистемных показателей и многокритериальной оценки [5]. Одной из таких разработок является пакет прикладных программ моделирования ядерно-энергетических систем (ППМ ЯЭС), описание функциональных возможностей которого (включая список объектов моделирования, ключевые приближения, области применения) приводится в работе. Следует отметить, что авторы не приводят в статье описание, анализ достоинств и недостатков других программ, так как это не входит в область текущего исследования.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ППМ ЯЭС

Программные модули ППМ ЯЭС предназначены для расчетной поддержки исследований в области ядерно-энергетического планирования, системного моделирования развития ядерной энергетики, оценки ядерных энерготехнологий и технологий ЯТЦ как в качестве самостоятельных расчетных средств, так и в составе пакетов прикладных программ технико-экономического моделирования ЯЭС. На основе программных модулей возможно конструировать комплексные расчетные модели для оценки материальных потоков и потребностей в услугах ЯТЦ (потребности в природном уране, услугах по конверсии и обогащению урана, изготовлению свежего топлива, хранению и переработке ОЯТ и т.п.) и показателей экономической эффективности сценариев развития ЯЭС. Основные программные модули:

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ОБЪЕКТАХ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

- NUDAPS (NUclear DAta Processing Spreadsheets) – подготовка одногрупповых нейтронных сечений, усредненных по стандартизированным и (или) задаваемым пользователем спектрам нейтронов;
- NUCLEX (NUclide Evolution eXplorer) – инструмент расчета эволюции нуклидного состава и характеристик ядерного топлива в реакторах и во внешней части ЯТЦ;
- NUCAB (NUclide Composition Adjustment and Blending tool) – корректировка изотопного состава топлива и нейтронного потока в случае необходимости расчетного описания работы реактора на новом изотопном составе ядерного топлива;
- FANES (material Flow Analysis data integrator for Nuclear Energy System) – оценка материальных потоков и потребностей в услугах ЯТЦ в сценариях развития ядерной энергетики;
- ECNES (Economic assessment tool for Nuclear Energy System) – оценка показателей экономической эффективности сценария развития ядерной энергетики.

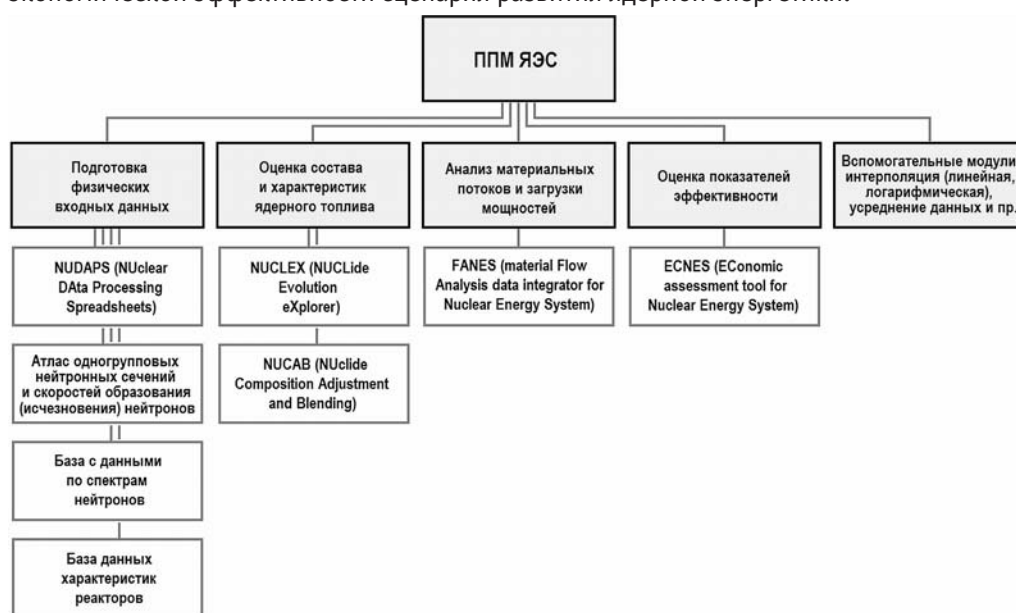


Рис. 1. Общая схема ППМ ЯЭС

Общая схема ППМ ЯЭС представлена на рис. 1. Следует подчеркнуть, что текущий релиз ППМ ЯЭС реализует традиционные для данной предметной области практики проведения общесистемных экономических оценок ЯЭС, используемые также в близких по функционалу зарубежных и отечественных программных средствах [5], которые, однако, не подразумевают моделирования организации работы всей энергосистемы (рассмотрение всех видов генерации, потребителей, технологические ограничения, сальдо перетоков, работа ОРЭМ, ценовые зоны, тарифы и т.п.). Также ППМ ЯЭС на текущем этапе не оценивает потребности в персонале АЭС и предприятий ЯТЦ.

Характерной чертой ППМ ЯЭС является модульный принцип организации программного обеспечения, автономность модулей, множественность реализованных расчетных моделей в каждом модуле, оценка неопределенностей расчетных функционалов в соответствии с неопределенностью исходных данных. Также ППМ ЯЭС сопровождается базой данных типовых реакторных характеристик, атласа одногрупповых нейтронных сечений для различных спектров нейтронов (для решения задачи нуклидной кинетики), базой с данными по спектрам нейтронов. Возможно формирование наборов исходных данных пользователем в соответствии с рассматриваемой задачей. Пользователь ответствен за формирование набора исходных данных для проведения экономических

оценок в соответствии с контекстом задачи и модельными предположениями, реализованными в модуле ECNES. Допущения расчетных моделей, реализованные в программных модулях ППМ ЯЭС, прописаны в пользовательских инструкциях [6 – 10]. Реализованные модельные предположения типичны для программных средств технико-экономического моделирования ЯЭС (табл. 1).

ППМ ЯЭС созданы с использованием встроенного языка электронных таблиц MS Excel Visual Basic for Applications (VBA) (базовый вариант) [11].

Таблица 1

Предположения и реализованные расчетные модели в модулях ППМ ЯЭС

Модуль	Назначение	Исходные данные	Приближения / функционал
NUDAPS	Вычисление одногрупповых нейтронных сечений, различных функционалов и их погрешностей на основе усредненных нейтронных сечений, представляющих собой линейные комбинации, произведения и отношения усредненных нейтронных сечений	Оцененные нейтронные данные из библиотек оцененных нейтронных данных и их ковариационные матрицы погрешностей, спектр нейтронов (эти данные размещены в специализированную базу оцененных нейтронно-физических данных ядер актиноидов)	Модуль содержит набор оцененных нейтронных данных и их ковариационные матрицы погрешностей для основных ядер-актиноидов в формате GENDF и BOXER (для ковариационных матриц погрешностей), набор стандартизированных спектров нейтронов (спектры деления, Максвелла, Ферми и пр.) и спектров нейтронов, характерных для различных типов энергетических реакторов (спектры могут быть заданы как в аналитическом, так и в табличном видах).
NUCLEX	Вычисление изменения во времени изотопного состава (массы и концентрации), активности, радиотоксичности, тепловыделения, нейтронного и гамма источников ядерного топлива	Начальный изотопный состав топлива, одногрупповые потоки нейтронов и нейтронные сечения как определенные на различных этапах облучения топлива в реакторе, так и одногрупповые поток и сечения, усредненные по всему циклу облучения и постоянные во времени, энергонапряженность активной зоны, выгорание ядерного топлива	Базовый набор ядер-актиноидов: ^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{241}Am , $^{242\text{m}}\text{Am}$, ^{243}Am , ^{242}Cm , ^{243}Cm , ^{244}Cm , ^{245}Cm , ^{246}Cm , ^{247}Cm , ^{248}Cm . Базовый набор продуктов деления и активации: ^3H , ^{14}C , ^{36}Cl , ^{54}Mn , ^{55}Fe , ^{60}Co , ^{59}Ni , ^{63}Ni , ^{79}Se , ^{85}Kr , ^{87}Rb , ^{90}Sr , ^{93}Mo , ^{94}Nb , ^{93}Zr , ^{98}Tc , ^{99}Tc , ^{102}Rh , ^{106}Ru , ^{107}Pd , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, $^{113\text{m}}\text{Cd}$, $^{121\text{m}}\text{Sn}$, ^{125}Sb , ^{126}Sn , $^{125\text{m}}\text{Te}$, $^{127\text{m}}\text{Te}$, ^{128}Sn , $^{129\text{I}}$, ^{134}Cs , ^{135}Cs , ^{137}Cs , ^{144}Ce , ^{146}Pm , ^{147}Pm , ^{146}Sm , ^{147}Sm , ^{151}Sm , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu , $^{166\text{m}}\text{Ho}$. Выходные данные (массы и концентрации основных актиноидов, продуктов деления, радиоактивность, остаточное тепловыделение, радиотоксичность, нейтронное и гамма-излучения) приводятся для конца цикла облучения, после охлаждения, на 100-й, 1000-й, 10000-й годы. Реализован функционал оценки константной и технологической неопределенности расчетных характеристик.
NUCAB	Вычисление значений и погрешности поправок обогащения ядерного топлива и суммарного нейтронного потока из учета сохранения доли тяжелых ядер в топливе, реактивности, мощности реакторной установки	Изотопный состав топливной композиции (проектный и фактический), одногрупповые нейтронные сечения, ковариационные матрицы погрешностей, суммарный нейтронный поток	Реализованы различные методики оценки поправок обогащения и суммарного нейтронного потока и их погрешностей с целью выбора наиболее приемлемой методики для ее последующей имплементации. Оцениваются неопределенности поправок, обусловленные исходными нейтронно-физическими данными.

Таблица 1 (продолжение)

Модуль	Назначение	Исходные данные	Приближения / функционал
FANES	Вычисление материальных потоков и потребностей в услугах ЯТЦ для основных переделов до- и зореакторных частей ЯТЦ, оценка неопределенностей в материальных показателях	Динамика ввода и вывода из эксплуатации энергоблоков, показатели топливоиспользования и выработки ОЯТ/РАО, изотопный состав свежего и облученного топлива, характеристики стратегии обращения с ОЯТ/РАО, делящимися материалами, принципы приоритизации/ управления складскими запасами ядерных материалов	Есть возможность учета распада изотопов во внешней части ЯТЦ при их поступлении в ЯТЦ в различные временные периоды, моделирования задержки на различных переделах ЯТЦ и в хранилищах ОЯТ, установки приоритетов потребления ограниченных ресурсов и задействования ограниченных мощностей предприятий ЯТЦ, оценки неопределенности расчета материальных показателей, обусловленной неопределенностью исходных технических данных
ECNES	Вычисление для сценария развития ЯЭС полных дисконтированных затрат, чистого дисконтированного дохода, внутренней нормы прибыли, индекса прибыльности, срока окупаемости, приведенной стоимости электроэнергии (тариф) безубыточности (LUEC), оценка неопределенностей в экономических показателях, обусловленных неопределенностью исходных стоимостных данных	Динамика ввода и вывода из эксплуатации энергоблоков, технико-экономические показатели энергоблоков, материальные потоки и потребности в услугах ЯТЦ (потребности в природном уране, услугах по конверсии и обогащению урана, изготовлению свежего топлива, хранению и переработке ОЯТ и т.п.), стоимостные данные по сооружению, эксплуатации и выводу из эксплуатации энергоблоков, товарам и услугам ЯТЦ, ставка дисконтирования, тариф на электроэнергию	Есть возможность учета распределения капитальных затрат (равномерное, синусоидальное распределение, распределение, определяемое полиномом 2-й степени, произвольное распределение), предусматривается корректировка капитальных затрат для блоков, остающихся в эксплуатации за горизонтом прогнозирования, учет амортизационных отчислений при эксплуатации исторических мощностей. Возможна оценка неопределенности экономических показателей, обусловленная неопределенностью исходных стоимостных данных (равномерное и треугольное распределение затрат, коррелированные и некоррелированные распределения входных величин)

Разработаны также версии программных модулей на языке программирования Python, в системе компьютерной алгебры MathCAD [12] и среде имитационно-динамического моделирования Stella Architect [13] с использованием встроенных языков программирования. Соответственно, для работы с ППМ ЯЭС необходимо наличие пакета приложений Microsoft Office. В случае использования версий программных модулей для MathCAD и Stella Architect необходимо наличие соответствующих сред моделирования.

Работа с ППМ ЯЭС осуществляется через стандартный интерфейс MS Excel. В случае использования версий программных модулей для MathCAD и Stella Architect имеются инженерные графические интерфейсы. Все программные модули отчуждаемы, потребность в авторском сопровождении определяется квалификацией пользователя.

Предполагается, что потенциальный пользователь ППМ ЯЭС владеет знанием основ ядерной инженерии, принципов ядерно-энергетического планирования, экономики атомной энергетики. Время счета с использованием моделей, разработанных с использованием ППМ ЯЭС, определяется сложностью модели и может составлять от нескольких секунд до нескольких часов.

ВЕРИФИКАЦИЯ ППМ ЯЭС

Программные модули верифицировались с использованием схожих по функционалу верифицированных (аттестованных) программных средств [14 – 16]. Для аналогичных модельных предположений и исходных данных получены идентичные результаты.

Комплексная верификация ППМ ЯЭС выполнялась на тестовых задачах, разработанных с целью кросс-верификации отечественных программных средств технико-экономического моделирования ЯЭС, которая проводилась в формате добровольной (инициативной) верификации в период 2020 – 2021 гг. [17]. В соответствии с техническими и экономическими данными, приведенными в описаниях тестовых задач, в ППМ ЯЭС были разработаны расчетные модели, которые описывают схемы движения материальных потоков, структуру и динамику изменения установленной мощности ЯЭС, учтены предположения, касающиеся обращения с облученным ядерным топливом (ОЯТ) и вторичными делящимися материалами. Разработанные модели позволяли рассчитать материальные показатели, включающие в себя потоки материалов и потребности в услугах ЯТЦ, а также экономические показатели. Результаты расчетов, выполненных с использованием ППМ ЯЭС, согласуются с расчетами, выполненными другими участниками кросс-верификации (наблюдаемые расхождения в расчетах объясняются модельными особенностями программ-участниц кросс-верификации).

НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ППМ ЯЭС

Программные модули ППМ ЯЭС использовались с 2008 г. для расчетной поддержки исследований в области ядерно-энергетического планирования, системного моделирования развития ядерной энергетики, оценки ядерных энерготехнологий и технологий ЯТЦ в Обнинском институте атомной энергетики НИЯУ МИФИ в рамках различных инициативных и хозяйственных НИР [18 – 20]. Ниже приведены некоторые примеры актуальных применений ППМ ЯЭС (следует подчеркнуть, все примеры носят исключительно иллюстративный характер и приводятся с целью демонстрации работоспособности созданного инструментария).

Моделирование сценариев трансмутации с учетом наработки радионуклидов во времени

С использованием ППМ ЯЭС проведено расчетное моделирование сценариев трансмутации РАО, образующегося при функционировании гипотетической ЯЭС с тепловыми реакторами в течении 1000 лет в двух предположениях: одномоментного появления всего объема РАО (вариант 1) и постепенной наработки РАО в соответствии со сценарием функционирования ЯЭС (вариант 2) [18]. В обоих смоделированных сценариях приняты одинаковые предположения касательно интегрального количества природного урана, требуемого для изготовления свежего топлива, и наработанного РАО, подвергающегося трансмутации (выжигаются плутоний и минорные актиниды в ускорительно-управляемых реакторных системах, интегральная эффективность трансмутационных установок в обоих сценариях одинакова (интегральная эффективность трансмутационной установки $\varepsilon_{\text{PT}} = \varepsilon_{\text{P}} \varepsilon_{\text{T}} / (1 - (1 - \varepsilon_{\text{T}}) \cdot \varepsilon_{\text{P}})$, где ε_{T} – глубина выжигания за цикл облучения и ε_{P} – эффективность фракционирования). В качестве референтного уровня, позволяющего сопоставить эффективность трансмутационной стратегии посредством оценки времени выхода по выбранному показателю на заданный уровень, используется радиотоксичность природного урана (при пероральном поступлении радионуклидов в организм), требуемого для фабрикации свежего топлива с целью обеспечения функционирования ЯЭС на протяжении всего жизненного цикла.

Показано, что при сопоставимых условиях вариант 1 (без учета наработки РАО во времени) дает заниженную оценку времени выхода по выбранному показателю на заданный референтный уровень по сравнению с вариантом 2 (с учетом наработки РАО во времени) (рис. 2). Однако если длительность функционирования ЯЭС не превышает 300

лет, то этим различием можно пренебречь (ошибка в значении времени выхода не будет превышать 200 лет). В тех сценариях, в которых функционирование ЯЭС предполагается свыше 300 лет, отсутствие учета наработки РАО во времени будет некорректным модельным предположением, поскольку ошибка в определении времени выхода на референтный уровень будет значительно превышать 200 лет. В целом, выполненные оценки демонстрируют, что чем дольше функционирует ЯЭС, тем эффект от трансмутации РАО становится менее выраженным.

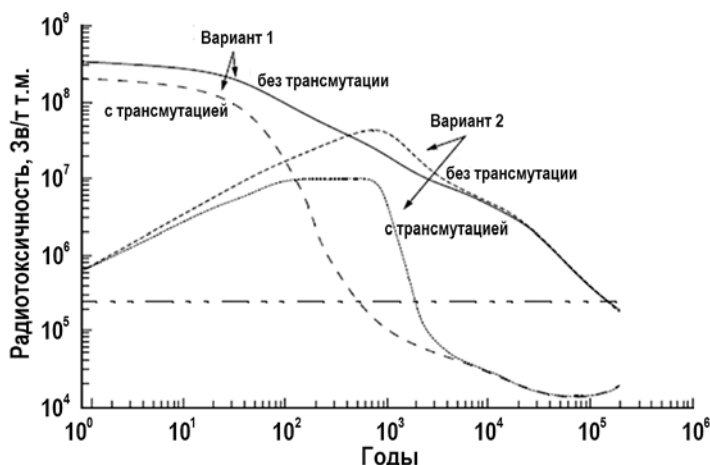


Рис. 2. Радиотоксичность РАО (включая продукты деления, активации, актиниды) при пероральном поступлении радионуклидов в организм для рассмотренного сценария функционирования ЯЭС

Моделирование сценариев развития российской двухкомпонентной ЯЭС с тепловыми и быстрыми натриевыми реакторами

ППМ ЯЭС использовался для моделирования сценариев развития российской двухкомпонентной ЯЭС с тепловыми и быстрыми натриевыми реакторами [19]. Рассмотрены следующие сценарии в структуре ЯЭС в 2100 г.:

- ВВЭР(100%): доли ВВЭР-ТОИ – 100%;
- ВВЭРмокс(10%): доли ВВЭР-ТОИ, ВВЭР-ТОИ МОКС – 90 и 10%;
- ВВЭРмокс(30%): доли ВВЭР-ТОИ, ВВЭР-ТОИ МОКС – 70 и 30%;
- ВВЭРмокс(50%): доли ВВЭР-ТОИ, ВВЭР-ТОИ МОКС – 50 и 50%;
- БН(20%): доли ВВЭР-ТОИ, БН – 80 и 20%;
- БН(50%): доли ВВЭР-ТОИ, БН – 50 и 50%;
- БН(90%): доли ВВЭР-ТОИ, БН – 10 и 90%;
- ВВЭРмокс(10%) БН(20%): доли ВВЭР-ТОИ, ВВЭР-ТОИ МОКС, БН – 70, 10 и 20%;
- ВВЭРмокс(50%) БН(20%): доли ВВЭР-ТОИ, ВВЭР-ТОИ МОКС, БН – 30, 50 и 20%;
- ВВЭРмокс(10%) БН(50%): доли ВВЭР-ТОИ, ВВЭР-ТОИ МОКС, БН – 40, 10 и 50%.

Показано, что при оценке исключительно материальных и экономических показателей включение тепловых реакторов с МОКС-топливом в двухкомпонентную ЯЭС приводит к снижению привлекательности соответствующего сценария в сравнении с сценариями без МОКС-топлива в тепловых реакторах (табл. 2). Отмечено, что вопрос об использовании плутония в тепловых реакторах требует детального изучения в связи с отсутствием неоспоримых аргументов, свидетельствующих о целесообразности реализации такого варианта: возможно, имеет смысл рассмотрение прочих соображений, которые могут сделать данный технологический вариант целесообразным (обеспечение референтности технологии для экспорта, необходимость «сжигания» избыточного плутония и пр.).

Таблица 2

Ключевые показатели эффективности десяти сценариев развития ЯЭС

Сценарий (в скобках указана доля технологии в 2100 г.)	Интегральное потребление урана, кг	Интегральные потребности в обогащении урана, кгЕРР	Интегральные потребности в переработке ОЯТ, кг т.м.	Количество ОЯТ в 2100, кг т.м.	Количество РАО в 2100, кг	Количество плутония в ЯТЦ в 2100, кг	Количество обедненного урана в 2100, кг	LUEC, миллс/кВтч
ВВЭР(100%)	787.65	666.75	0	126.98	0	1.09	1669.03	29.48
ВВЭРмокс(10%)	782.92	662.72	27.36	106.12	26.92	0.84	1658.34	29.89
ВВЭРмокс(30%)	776.18	656.97	71.81	69.11	70.76	0.54	1644.80	30.40
ВВЭРмокс(50%)	772.07	653.46	92.71	51.06	91.42	0.41	1638.11	30.57
БН(20%)	658.10	556.25	12.15	111.54	10.96	1.02	1544.24	29.53
БН(50%)	492.27	414.81	41.77	77.70	38.93	0.91	1384.26	30.22
БН(90%)	284.97	237.99	100.28	13.96	95.37	0.76	1184.07	31.09
ВВЭРмокс(10%) БН(20%)	651.51	550.63	346.08	81.58	46.76	0.77	1531.93	30.29
ВВЭРмокс(50%) БН(20%)	640.97	541.64	126.27	14.46	123.68	0.34	1511.78	31.57
ВВЭРмокс(10%) БН(50%)	470.99	396.66	79.63	44.59	76.26	0.65	1359.36	31.70

Оценка приведенной стоимости электроэнергии АЭС с различными типами ядерных реакторов

ППМ ЯЭС использовался для оценки приведенной стоимости электроэнергии АЭС (LUEC) с различными типами ядерных реакторов с учетом неопределённости в стоимостных данных по сооружению и эксплуатации реакторных установок, а также по товарам и услугам ЯТЦ (табл. 3) [20].

Рассмотрены три типа тепловых реакторов (LWR, HWR и ALWR), работающих в открытом ЯТЦ, и четыре варианта быстрых реакторов (FR-1, FR-2, AFR и FR-U), функционирующих в замкнутом уран-плутониевом ЯТЦ (технические данные по рассмотренным технологиям были взяты из международного проекта МАГАТЭ GAINS, стоимостные данные – из отчета, подготовленного в рамках одного из исследований в интересах Министерства энергетики США [20]).

- LWR – реактор типа PWR с выгоранием 45 ГВт·сут./т тм, обогащением топлива 4%, удельной энергонапряженностью активной зоны 38,5 МВт/т и КИУМ 85%.

- ALWR – это усовершенствованный LWR с высоким выгоранием топлива, по сравнению с LWR равновесная загрузка топлива в ALWR на 30% меньше, чем в LWR, начальное обогащение топлива составляет 3,4%, равновесное обогащение топлива – 4,95%.

- HWR – тяжеловодный водо-водяной ядерный реактор с выгоранием 7 ГВт·сут./т тм, топливо на основе природного урана, удельная энергонапряженность активной зоны – 24,0 МВт/т, КИУМ – 85%.

- FR-1 – реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, имеющий коэффициент воспроизводства, близкий к единице, и средним (активная зона и бланкеты) выгоранием топлива ~ 38 ГВт·сут./т тм.

- FR-2 – прототип быстрого реактора-размножителя с натриевым теплоносителем со средним коэффициентом воспроизводства 1,16 и средним (активная зона и бланкеты) выгоранием топлива ~ 31 ГВт·сут./т тм.

Таблица 3

Показатель LUEC и его компоненты

Тип ЯЭУ	Показатель LUEC и его составляющие, миллс/кВт-ч.			
	LUAC	LUOM	LUFC	LUEC
LWR*	37.6 ± 9.3	12.2 ± 1.2	8.9 ± 2.3	58.7 ± 9.6
LWR**	37.6 ± 9.5	12.2 ± 1.2	9.9 ± 2.3	59.8 ± 9.8
HWR*	36.2 ± 9.1	12.2 ± 1.3	10.6 ± 2.0	59.2 ± 9.3
HWR**	36.2 ± 9.1	12.2 ± 1.2	17.6 ± 3.2	65.8 ± 9.8
ALWR*	35.4 ± 8.8	11.6 ± 1.2	6.7 ± 1.5	53.8 ± 9.0
ALWR**	35.3 ± 8.7	11.6 ± 1.2	7.5 ± 1.5	54.5 ± 9.1
FR-1	40.2 ± 12.0	12.5 ± 1.2	13.5 ± 2.4	66.2 ± 12.4
FR-2	40.0 ± 12.1	12.5 ± 1.2	14.2 ± 2.4	67.3 ± 12.4
AFR	40.4 ± 12.1	12.6 ± 1.2	8.9 ± 1.5	61.4 ± 12.1
FR-U	40.4 ± 12.0	12.6 ± 1.2	12.9 ± 2.0	65.7 ± 12.2

* – хранение ОЯТ в централизованном хранилище за пределами реакторного здания в течение всего жизненного цикла;
 ** – окончательное захоронение ОЯТ в глубокие геологические формации после 5 лет охлаждения;
 LUAC – составляющая, связанная с капитальными затратами;
 LUOM – составляющая, связанная с ежегодными затратами на эксплуатацию и техническое обслуживание;
 LUFC – составляющая, связанная с расходами на изготовление свежего топлива и обращение с ОЯТ

• AFR – коммерческий реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем со средним коэффициентом воспроизводства 1,2 и средним (активная зона и бланкеты) выгоранием топлива – 54 ГВт-сут./т тм. В отличие от FR-1 и FR-2 свежее топливо для AFR содержит около 1% минорных актинидов (МА).

• FR-U – быстрый реактор со свинцовым теплоносителем, в котором используется обогащенное урановое топливо (обогащение около 15% по ²³⁵U) для стартовой загрузки активной зоны и первых перегрузок, предполагается последующая переработка ОЯТ и использование вторичного ядерного топлива (Pu + U + МА). Бланкет не предусмотрен. Коэффициент воспроизводства – 1,05, выгорание ~ 72,8 ГВт-сут./т тм.

По результатам оценки приведенной стоимости электроэнергии с учетом неопределённости в ее значениях, обусловленных разбросом в стоимостных данных, сделан вывод, что нельзя сделать однозначное суждение о наибольшей привлекательности той или иной концепции быстрых реакторов, опираясь только на анализ приведенной стоимости электроэнергии, а также некорректно делать категорические утверждения о более низкой экономической эффективности и конкурентоспособности быстрых реакторов по сравнению с тепловыми реакторами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пакет прикладных программ моделирования ядерно-энергетических систем (ППМ ЯЭС) предназначен для расчетной поддержки системных исследований и технико-экономического моделирования ЯЭС. Выполненные тестовые, верификационные и кросс-верификационные расчеты с использованием схожих по функционалу верифицированных (аттестованных) программных средств и аналогичных модельных предположений продемонстрировали корректность методик и алгоритмов, реализованных в ППМ ЯЭС. Опыт применения ППМ ЯЭС позволяет сделать вывод, что созданный инструментарий является эффективным средством поддержки расчетных исследований в области ядерно-энер-

гетического планирования и системного моделирования, особенно в тех случаях, в которых необходимо оценить влияние неопределенностей в исходных данных и модельных предположениях на результаты расчётного моделирования.

Литература

1. *Silvenpoinen P.* Nuclear fuel cycle optimization: methods and modelling techniques. – New York, Pergamon Press Publ., 1982. – 138 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-027310-5.50006-0>. ISBN 978-1-4831-4554-9.
2. *Клименко А.В.* Математическая модель оптимизации энергосистемы и ее применение: Монография. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 292 с.
3. *Муравьев Е.В.* Системные исследования в обоснование стратегии развития ЯЭ. – М.: АО «НИКИЭТ», 2019. – 412 с.
4. *Brown N.R., Carlsen B.W., Dixon B.W. et al.* Identification of fuel cycle simulator functionalities. // *Annals of nuclear energy*. – 2016. – Vol. 96. – PP. 88-95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2016.05.027>.
5. *Андреанов А.А., Гурин А.В., Дырда Н.Д. и др.* Программные комплексы технико-экономического моделирования ядерно-энергетических систем: текущее состояние и перспективы развития. // *Атомная энергия*. – 2020. – Т. 128. – Вып. 6. – С. 344-352.
6. *Андреанов А.А., Андреанова О.Н., Купцов И.С.* NUCLEX (Nuclide Evolution Explorer) – программное средство для расчета эволюции нуклидного состава и характеристик ядерного топлива в реакторах и во внешней части ядерного топливного цикла. Депонированная рукопись № 3-B2021. – М.: ВИНТИ РАН, 2021. – 40 с.
7. *Андреанов А.А., Андреанова О.Н.* NUDAPS (Nuclear Data Processing Spreadsheets) – программное средство для вычисления значений и погрешностей тепловых нейтронных сечений, резонансных интегралов и малогрупповых нейтронных сечений. Депонированная рукопись № 4-B2021. – М.: ВИНТИ РАН, 2021. – 72 с.
8. *Андреанов А.А., Андреанова О.Н., Купцов И.С.* FANES (Material Flow Analysis Data Integrator for Nuclear Energy System) – программное средство моделирования динамики движения ядерных материалов в топливном цикле ядерно-энергетической системы. Депонированная рукопись № 51-B2021. – М.: ВИНТИ РАН, 2021. – 50 с.
9. *Андреанов А.А., Андреанова О.Н.* NUCAB (Nuclide Composition Adjustment and Blending Tool) – программное средство корректировки обогащения ядерного топлива в реакторе при изменении изотопного состава тяжелых ядер. Депонированная рукопись № 52-B2021. – М.: ВИНТИ РАН, 2021. – 31 с.
10. *Андреанов А.А.* ECNES (Economic Assessment Tool for Nuclear Energy System) – программное средство для оценки показателей экономической эффективности сценария развития ядерно-энергетической системы. Депонированная рукопись № 50-B2021, 2021. – 47 с.
11. ПО для работы с электронными таблицами MS Excel. Электронный ресурс: <https://www.microsoft.com/ru-ru/microsoft-365/excel> (дата доступа 10.01.2022).
12. Инженерное математическое ПО Mathcad. Электронный ресурс: <https://www.mathcad.com/ru> (дата доступа 10.01.2022).
13. Инструмент для моделирования Stella Architect. Электронный ресурс: <https://www.iseesystems.com/store/products/stella-architect.aspx> (дата доступа 10.01.2022).
14. *Modelling nuclear energy systems with MESSAGE: A Users' Guide*, IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-5.2, Vienna, 2016. Электронный ресурс: <https://www.iaea.org/publications/10861/modelling-nuclear-energy-systems-with-message-a-users-guide> (дата доступа 10.01.2022).
15. *INPRO methodology for sustainability assessment of nuclear energy systems: Economics*. INPRO manual, IAEA Nuclear Energy Series NG-T-4.4, 2014. Электронный ресурс: <https://www.iaea.org/publications/10604/inpro-methodology-for-sustainability-assessment-of-nuclear-energy-systems-economics> (дата доступа 10.01.2022).
16. *Nuclear fuel cycle simulation system: Improvements and applications*, IAEA-TECDOC-1864, IAEA, Vienna, 2019. Электронный ресурс: <https://www.iaea.org/publications/13502/nuclear-fuel-cycle-simulation-system-improvements-and-applications> (дата

доступа 10.01.2022).

17. Алтынникова У.Ф., Дырда Н.Д., Макеева И.Р. и др. Верификация программных средств технико-экономического моделирования ядерно-энергетических систем: результаты и рекомендации // Атомная энергия. – 2021. – Т. 131. – Вып. 4. – С. 192-199.

18. Андрианов А.А., Догов А.А., Коровин Ю.А., Купцов И.С. Подход к определению оптимальной стратегии ядерной трансмутации // Ядерная физика и инжиниринг. – 2014. – Т. 5. – № 2. – С. 122. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2079562914010011>.

19. Andrianov A.A. et al. A scenario study on the transition to a closed nuclear fuel cycle using the nuclear energy system modelling application package (NESAPP). // EPJ Nuclear Sci. Technol. – 2022 – Vol. 8. – No. 2. – P. 11. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjn/2021029>.

20. Андрианов А.А., Ковганко Д.В. Прогнозирование удельных дисконтированных затрат на производство электроэнергии на АЭС с различными типами ядерных реакторов // Вестник НИЯУ МИФИ. – 2020. – Т. 9. – № 4. – С. 368-375. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2304487X20040033>.

Поступила в редакцию 10.01.2022 г.

Авторы

Андрианов Андрей Алексеевич, доцент, к.т.н.

E-mail: andreyandrianov@yandex.ru

Купцов Илья Сергеевич, доцент, к.ф.-м.н.

E-mail: kuptsov_ilia@list.ru

Осипова Татьяна Александровна, и.о. директора ИАТЭ НИЯУ МИФИ

E-mail: TAOsipova@mephi.ru

Спирidonова Анастасия Алексеевна, инженер

E-mail: aaspiridonova@mephi.ru

Андрианова Ольга Николаевна, независимый эксперт, к.т.н.

E-mail: o.n.andrianova@yandex.ru

Утянская Татьяна Владимировна, независимый эксперт

E-mail: tvutya@gmail.com

UDC 621.039.003

NUCLEAR ENERGY SYSTEM MODELLING APPLICATION PACKAGE: FUNCTIONAL OVERVIEW AND EXAMPLES

Andrianov A.A.*, Kuptsov I.S.*, Osipova T.A.*, Spiridonova A.A.*,

Andrianova O. N.**, Utyanskaya T. V.**

* IATE MEFHI

1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga Reg., 249039 Russia

**Independent Expert

ABSTRACT

The article delineates the nuclear energy system modelling application package (NESAPP) which can be used to develop models for assessing material flows, needs for nuclear fuel cycle services and economic performance metrics for evolving nuclear energy systems. NESAPP is a set of codes designed to support nuclear energy planning and nuclear fuel cycle transition scenario studies, including the following modules: NUDAPS (a module for calculating thermal neutron cross-sections, resonance integrals and few-group neutron cross-sections, and associated uncertainties), NUCLEX (a module

for calculating the evolution of the nuclide composition and characteristics of nuclear fuel in reactors and in the external nuclear fuel cycle), NUCAB (a module for adjusting isotopic composition and blending), FANES (a module for analysing material flows and integrating data in nuclear energy system evolution scenarios), ECNES (a module for assessing economic performance metrics for nuclear energy system evolution scenarios). Each module can be considered both as an independent software tool and as a component of the software tool for technical and economic modelling of the nuclear energy system deployment. Various calculation models are implemented in the modules, allowing users to assess the uncertainties associated with the method applied as well as to perform uncertainty treatment with respect to modelling results due to the initial data uncertainty. The paper also provides some examples of applying the developed tools.

Key words: technical and economic modelling, scenario analysis, nuclear energy, nuclear energy system, nuclear technologies, nuclear fuel cycle, software tool

REFERENCES

1. Silvennoinen P. *Nuclear Fuel Cycle Optimization: Methods and Modelling Techniques*. New York, Pergamon Press, 1982, 138 p.; DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-027310-5.50006-0>. ISBN 978-1-4831-4554-9.
2. Klimenko A.V. *Mathematical Model of Power System Optimization and its Application*. Moscow. NIYaU MIFI Publ., 2010, 292 p. (in Russian).
3. Muravev E.V. System Research in Justification of Nuclear Power Development Strategy. Moscow, NIKIET JSC Publ., 2019. 412 p. (in Russian).
4. Brown N.R., Carlsen B.W., Dixon B.W., Feng B., Greenberg H.R., Hays R.D., Passerini S., Todosow M., and Worrall A. Identification of Fuel Cycle Simulator Functionalities. *Annals of Nuclear Energy*. 2016, v. 96, pp. 88-95; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2016.05.027>.
5. Andrianov A.A., Gurin A.V., Dyrda N.D., Kvyatkovskii S.A., Makeeva I.R., Molokanov N.A., Murav'ev E.V., Ptitsyn P.B., Rodionova E.V., Teplov P.S. Software Packages for Technical and Economic Modeling of Nuclear Energy Systems: Status and Development Prospects. *Atomic Energy*. 2020, v. 128, iss. 6, pp. 344-352; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-020-00702-7>.
6. Andrianov A.A., Andrianova O.N., Kuptsov I.S. *NUCLEX (Nuclide Evolution eXplorer) – a Software Tool for Calculating the Evolution of the Nuclide Composition and Characteristics of Nuclear Fuel in Reactors and in the External Nuclear Fuel Cycle*. Deposited manuscript No. 3-V2021. Moscow. VINITI RAN Publ., 2021, 40 p. (in Russian).
7. Andrianov A.A., Andrianova O.N. *NUDAPS (NUclear DATA Processing Spreadsheets) – a Software Tool for Calculating Thermal Neutron Cross-Sections, Resonance Integrals and Few-Group Neutron Cross-Sections and Associated Uncertainties*. Deposited manuscript No. 4-V2021. Moscow. VINITI RAN Publ., 2021, 72 p. (in Russian).
8. Andrianov A.A., Andrianova O.N., Kuptsov I.S. *FANES (Material Flow Analysis Data Integrator for Nuclear Energy System) – a Software Tool for Material Flow Analysis and Data Integration in Nuclear Energy System Evolution Scenarios*. Deposited manuscript No. 51-V2021. Moscow. VINITI RAN Publ., 2021, 50 p. (in Russian).
9. Andrianov A.A., Andrianova O.N. *NUCAB (Nuclide Composition Adjustment and Blending Tool) – a Software Tool for Isotopic Composition Adjustment and Blending*. Deposited manuscript No. 52-V2021. Moscow. VINITI RAN Publ., 2021, 31 p. (in Russian).
10. Andrianov A.A. *ECNES (Economic Assessment Tool for Nuclear Energy System) – a Software Tool for Assessing Economic Performance Metrics for Nuclear Energy System Evolution Scenarios*. Deposited manuscript No. 50-V2021. Moscow. VINITI RAN Publ., 2021, 47 p. (in Russian).
11. Software for Working with MS Excel Spreadsheets. Available at: <https://www.microsoft.com/ru-ru/microsoft-365/excel> (accessed Jan. 10, 2022).

12. Engineering Mathematical Software Mathcad. Available at: <https://www.mathcad.com/ru> (accessed Jan. 10, 2022).
13. Stella Architect Modelling Tool. Available at: <https://www.iseesystems.com/store/products/stella-architect.aspx> (accessed Jan. 10, 2022).
14. Modelling Nuclear Energy Systems with MESSAGE: A Users' Guide, IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-5.2, 2016. Available at: <https://www.iaea.org/publications/10861/modelling-nuclear-energy-systems-with-message-a-users-guide> (accessed Jan. 10, 2022).
15. *INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Economics. INPRO manual.* IAEA Nuclear Energy Series NG-T-4.4, IAEA, 2014. Available at: <https://www.iaea.org/publications/10604/inpro-methodology-for-sustainability-assessment-of-nuclear-energy-systems-economics> (accessed Jan. 10, 2022).
16. *Nuclear Fuel Cycle Simulation System: Improvements and Applications.* IAEA-TECDOC-1864, IAEA, 2019. Available at: <https://www.iaea.org/publications/13502/nuclear-fuel-cycle-simulation-system-improvements-and-applications> (accessed Jan. 10, 2022).
17. Altynnikova U.F., Andrianov A.A., Gurin A.V., Dyrda N.D., Kuptsov I.S., Makeeva I.R., Muravev E.V., Ptitsyn P.B., Fomichenko P.A. Verification of Software Tools for Technical and Economic Modelling of Nuclear Energy Systems: Results and Recommendations. *Atomic Energy.* 2021, v. 131. iss. 4, pp. 192-199.
18. Andrianov A.A., Dogov A.A., Korovin Yu.A., Kuptsov I.S. An Approach to Identification of Optimal Nuclear Transmutation Strategies. *Yadernaya fizika i inzhiniring.* 2014, v. 5, no. 2, p. 122.
19. Andrianov A.A., Andrianova O.N., Kuptsov I.S., Utyanskaya T.V., Svetlichny L.I. A Scenario Study on the Transition to a Closed Nuclear Fuel Cycle Using the Nuclear Energy System Modelling Application Package (NESAPP). *EPJ Nuclear Sci. Technol.*, 2022, v. 8, no. 2, p. 11; DOI: <https://doi.org/10.1051/epjn/2021029>.
20. Andrianov A.A., Kovganko D.V. Prediction of the Levelized Cost of Electricity for Nuclear Power Plants with Different Nuclear Reactors. *Vestnik NIYaUMIFI*, 2020, v. 9, no. 4, pp. 368-375; DOI: <https://doi.org/10.1134/S2304487X20040033>.

Authors

Andrianov Andrey Alekseevich, Associate Professor, Cand. Sci. (Nuclear Engineering)

E-mail: andreyandrianov@yandex.ru

Kuptsov Ilya Sergeevich, Associate Professor, Cand. Sci.

E-mail: kuptsov_ilia@list.ru

Osipova Tatiana Alexandrovna, Acting Director of IATE MEFHI

E-mail: TAOsipova@mephi.ru

Spiridonova Anastasia Alekseevna, Engineer

E-mail: aaspiridonova@mephi.ru

Andrianova Olga Nikolaevna, Independent Expert, Cand. Sci. (Nuclear Engineering)

E-mail: o.n.andrianova@yandex.ru

Utyanskaya Tatiana Vladimirovna, Independent Expert

E-mail: tvutya@gmail.com