
УДК 621.039.53:621.039.77

К ВОПРОСУ О СИСТЕМНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОЕКТНОМ ОБЛИКЕ УСТАНОВКИ ПО УТИЛИЗАЦИИ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА С ЯДЕРНО-ОПТИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ

© 2020 г. И. Н. Хиблин¹, А. В. Карелин², В. В. Онуфриев^{3, *}, В. В. Синявский⁴

¹Научно-производственная корпорация “Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы” им. А.Г. Иосифьяна, Москва, Россия

²Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, Королев, Россия

³Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

⁴Ракетно-космическая корпорация “Энергия” им. С.П. Королёва, Королев, Россия

*e-mail: onufryev@bmstu.ru

Поступила в редакцию 17.02.2020 г.

После доработки 25.02.2020 г.

Принята к публикации 27.02.2020 г.

Накопление радиоактивных отходов (РАО) и отработанного ядерного топлива (ОЯТ) требуют поиска новых способов утилизации их с целью снижения их количества в Земной экосфере. В этой связи перспективным способом рассматривается утилизация РАО с применением ядерно-оптического преобразования (ЯОП) энергии РАО в электрическую. В работе приведена система многоуровневого проектирования энергетической установки с ядерно-оптическим преобразованием энергии на основе РАО (энергетическая утилизация). Рассмотрены уровни проектирования, их взаимосвязь и алгоритм проектирования энергетической установки на основе единой электронной модели в среде “MSC.Patran”. Результаты работы могут быть полезны при разработке установок с ЯОП.

Ключевые слова: отработанное ядерное топливо, радиоактивные отходы, система многоуровневого проектирования, внешний уровень, внутренний уровень проектирования, единая электронная модель

DOI: 10.31857/S0002331020020041

ВВЕДЕНИЕ

Вопросам утилизации радиоактивных отходов (РАО) в настоящее время уделяется достаточно много внимания [1, 2]. К сентябрю 2019 г., согласно данным Международного агентства по атомной энергии, в мире функционирует 449 энергетических ядерных реакторов, в том числе: в США – 96, Франции – 58, Китае – 48, Японии – 37, России – 36, Республике Корея – 25, Индии – 22, Англии – 15, Германии – 7 [3].

Актуальность работы в области создания новых методик проектирования установок с ядерно-оптическим преобразованием (ЯОП) энергии, использующих в качестве топлива радиоактивные отходы (РАО), обусловлена:

- проведением в настоящее время работ по разработке новых ЯЭУ повышенной мощностью (свыше 1000 МВт) [4], которые после вывода из эксплуатации становятся радиоактивными объектами. Необходимо осуществлять замкнутый цикл получения и использования ядерного топлива, включая его утилизацию;

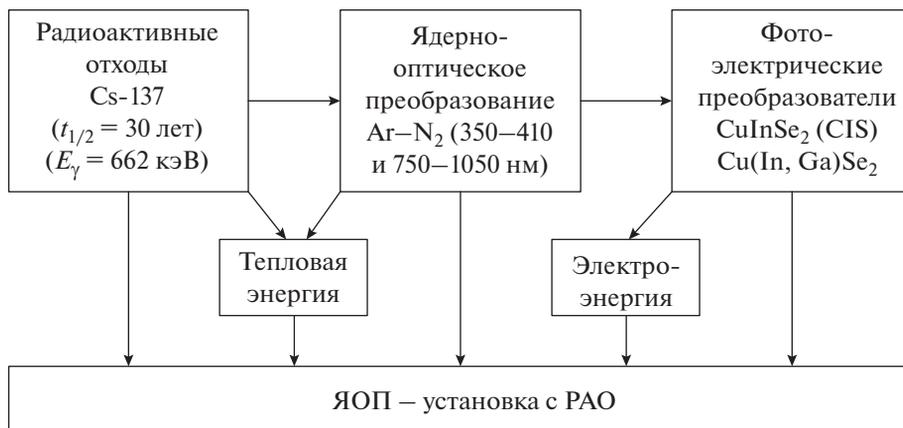


Рис. 1. Схема установки утилизации РАО с ЯОП преобразованием энергии отходов, $t_{1/2}$ – период полураспада, E_{γ} – энергия гамма-кванта.

- отсутствием на сегодняшний день глубоких проектных проработок установок с ЯОП на основе РАО, включающих уровни внешнего и внутреннего проектирования (конструкционно-компоновочная, конструкционно-силовая схема, теплонпряженное состояние узлов и агрегатов, динамические характеристики) перспективных установок с ЯОП энергии отработанного ядерного топлива;

- отсутствием результатов проектных работ по техническому облику установок с ЯОП энергии, когда РАО или отработанное ядерное топливо (ОЯТ) являются первичным источником энергии;

- необходимостью исследования задачи энергетических, радиационных, теплофизических, массогабаритных характеристик установок ЯОП, создания проектного облика установок ЯОП, определения его массово-энергетических и динамических характеристик, разработки конструкционно-силовой схемы, моделей теплонпряженного состояния его узлов и агрегатов;

- необходимостью создания современного программного обеспечения для проведения расчётов внешнего и внутреннего проектирования в рамках единой электронной модели, позволяющей исследовать на каждом этапе проектирования массогабаритные и динамические характеристики установок ЯОП на ОЯТ с учетом теплонпряженного состояния узлов и оптимизировать их конструкцию.

Состав предлагаемой установки с ЯОП энергии ОЯТ (или РАО) может быть следующим [5, 12, 13]:

- активная зона с ампулами, заполненными ОЯТ, и прокачкой рабочей лазерно-активной среды (ЛАС), снабженная устройством теплоотвода;
- фотопреобразующая система с фотоэлектрическими преобразователями (ФЭП), работающими под действием излучения из ЛАС;
- радиационная защита, расположенная вокруг активной зоны;
- система коммутации ФЭП;
- система контроля и управления;
- система регулирования и аварийной защиты.

На рисунке 1 приведена укрупненная схема установки утилизации РАО с ЯОП энергии радиоактивных отходов при утилизации.

Для поиска оптимального решения указанной задачи целесообразно провести оценки массовой доли ОЯТ, которую необходимо загрузить в установку с ЯОП, чтобы

получить требуемую величину электрической энергии на выходе. Это позволит сформировать требования к узлам и агрегатам установки с ЯОП ОЯТ, ее конструкционно-компоновочной схеме, массогабаритным характеристикам, теплофизическому состоянию ее узлов и агрегатов, так как именно эти параметры определяют прочностные и динамические характеристики и позволяют определить проектный облик, сформировать конструкционно-силовую схему всей установки [9].

Такой подход предопределяет формирование системы многоуровневого проектирования установки с ЯОП ОЯТ:

- внешнее проектирование (энергофизическое и массоэнергетическое, которое определяет требования к характеристикам установки с ЯОП, обеспечивающей выполнение энергетической задачи);
- формирование технического облика установки с ЯОП и построение трехмерной твердотельной модели конструкционно-компоновочной схемы ее активной зоны (основного элемента с учетом полученных результатов исследования на этапе внешнего проектирования, используемых в конструкционном варианте);
- внутреннее проектирование (создание конструкционно-силовой схемы активной зоны установки с ЯОП);
- формирование технических решений по созданию трехмерной конечно-элементной модели конструкционно-силовой схемы установки с ЯОП на основе данных предыдущих уровней проектирования и исследование прочностных и жесткостных характеристик вариантов проектных решений с учетом теплонапряженного состояния агрегатов и узлов.

СИСТЕМА МНОГОУРОВНЕВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ В РАМКАХ ЕДИНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МОДЕЛИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЛИКА УСТАНОВКИ С ЯДЕРНО-ОПТИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Система многоуровневого проектирования установки с ЯОП на основе утилизации РАО в рамках единой электронной модели связывает:

- уровень внешнего проектирования с формированием рационального технического облика установки с ядерно-оптическим преобразованием энергии РАО (ОЯТ) и построением трехмерной твердотельной модели конструкционно-компоновочной схемы;
- уровень внутреннего проектирования (создание трехмерной модели конструкционно-силовой схемы с учетом теплонапряженного состояния агрегатов и узлов установки с ЯОП ОЯТ).

Это означает, что в рамках единой электронной модели необходимо осуществить исследование энергофизической и массоэнергетической задачи, теплонапряженного состояния с помощью пакета трехмерного конечно-элементного моделирования “MSC.Patran” [5, 9, 10] и динамики конструкции установки ЯОП с выходом на массово-габаритный анализ ее узлов и агрегатов.

На основании этого была разработана новая система многоуровневого проектирования в рамках единой электронной модели проектирования установки ЯОП энергии РАО, представленная на рис. 2.

Проектирование установки ЯОП на основе ОЯТ (РАО) начинается с внешнего уровня исследования ее энергофизических и массоэнергетических характеристик [9].

Внешний уровень проектирования включает следующие этапы:

- энергофизического и массоэнергетического проектирования;
- формирования проектного облика;
- исследования и проектирования геометрических характеристик агрегатов с учетом их теплового состояния (ампул с РАО – источника первичной энергии);
- построения трехмерной твердотельной модели конструкционно-компоновочной схемы установки (активной зоны).



Рис. 2. Система многоуровневого проектирования установки по утилизации РАО с ЯОП энергии РАО.

Все этапы увязаны в единую цепочку, имеющую обратные связи (уточнение удельных масс агрегатов на трех последних этапах). Наличие обратной связи этапов позволяет совершать итерации по изменению массо-геометрических характеристик на уровне внешнего проектирования (так как проектирование ведется с учетом температурного режима агрегатов).

Входными данными для этапа «энергофизического проектирования» являются:

- основным источником проникающей радиации ОЯТ реакторов является γ -излучение Cs^{137} (период полураспада 30 лет) с энергией $E_\gamma = 662$ кэВ [11];

- в качестве активной среды задана смесь аргона и азота $Ar-N_2$ (в соотношении 45 : 1), излучающая преимущественно в диапазонах длин волн 350–410 и 750–1050 нм на переходах $C \rightarrow B$ и $B \rightarrow A$ молекулы азота N_2 соответственно [12, 13];

- ампула с ЯОТ характеризуется предварительно оцененными следующими геометрическими параметрами: диаметром $d = 0.5$ м и высотой $h = 1$ м;

- задается количество ампул (200–220 шт.);

- задается давление активной среды от 0.5 МПа до 1 МПа;

- задается гамма-активность жесткого ионизатора: скорость $f = 8.6 \times 10^{16}$ распадов/($m^3 \cdot c$).

Более подробно связи и алгоритм этапа энергофизического проектирования приведены на рис. 3.

Массоэнергетическая модель проектирования представляет собой систему уравнений, связывающих параметры:

- зависимости удельной мощности P излучения и КПД смеси $Ar-N_2$ от концентрации азота $[N_2]$ для давлений аргона 0.5 и 1 МПа при частоте ионизации $\nu = 10^{-17} c^{-1}$;

- зависимости оптимальной концентрации азота от частоты ионизации для различных полных давлений $Ar-N_2$ -смеси;

- зависимости удельной мощности излучения P и КПД от температуры $Ar-N_2$ (45 : 1) смеси для различных частот ионизации ν ;

- зависимости удельной мощности излучения P от давления $Ar-N_2$ смеси для различных частот ионизации. Концентрация азота в каждой расчетной точке задавалась оптимальной по КПД;

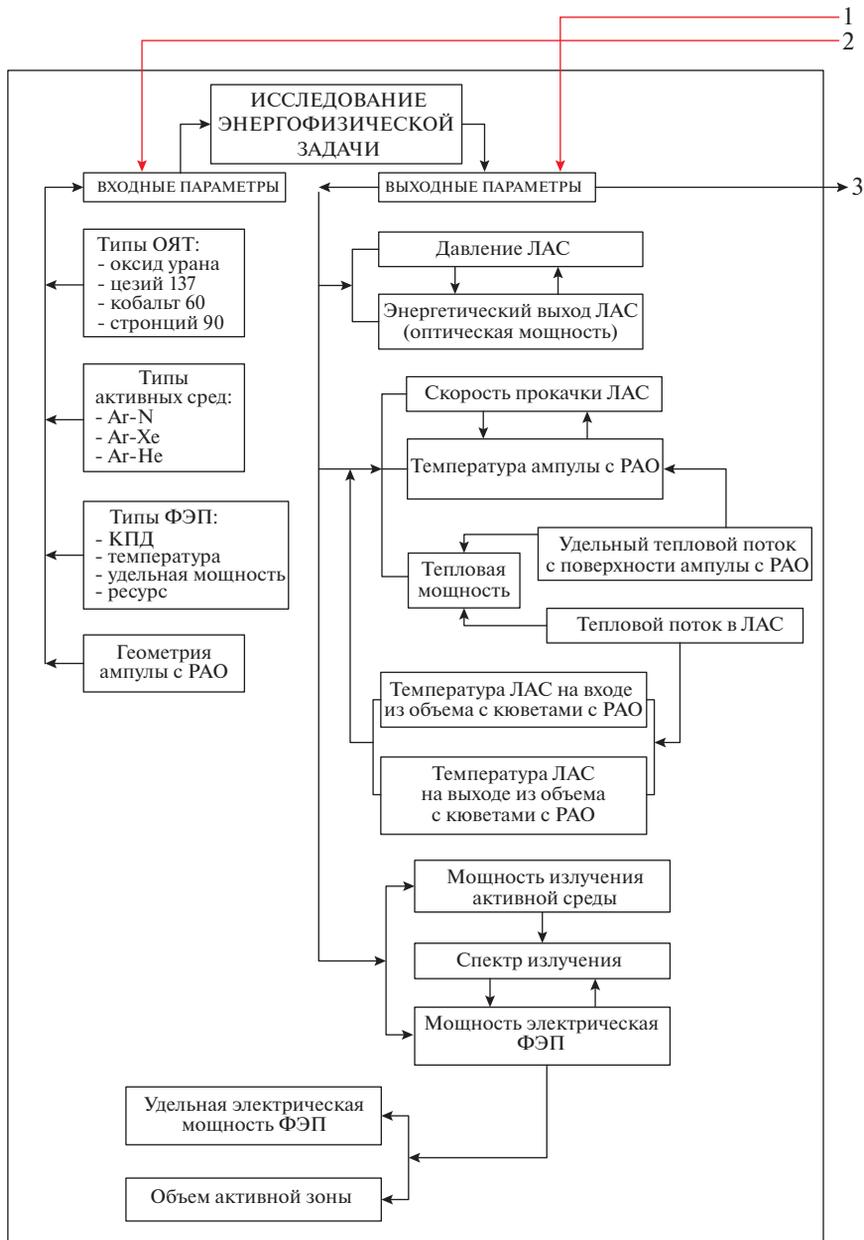


Рис. 3. Этап энергофизического проектирования: линия 1 – обратная связь по влиянию полученных энергетических решений на оптимальные выходные параметры ЯОП установки по утилизации РАО; линия 2 – обратная связь по влиянию выходных параметров массоэнергетической модели на оптимальные выходные параметры ЯОП установки по утилизации РАО; линия 3 – выходные параметры этапа энергофизического проектирования (являются входными параметрами для массоэнергетической модели).

- зависимость нагрева Ar-N_2 смеси ΔT от скорости прокачки w через активный объем ЯОП при удельной мощности тепловыделения в $q = 0.001; 0.1$ и 1 Вт/см^3 ;
- зависимость перепада температур от стенки к газу от скорости прокачки w через активный объем ЯОП при указанной удельной мощности тепловыделения;
- зависимость перепада температур внутри стенки ампулы от удельной мощности тепловыделения;
- зависимость мощности, требуемой для прокачки газовой смеси, через весь газодинамический контур ЯОП-установки, от скорости прокачки w газа.

Выходными данными являются варианты энергомассовых решений активной зоны установки ЯОП ОЯТ в зависимости от:

- удельной плотности мощности тепловыделения;
- давления газовой смеси;
- скорости движения газа.

В результате определяется поле параметров установки с ЯОП ОЯТ для расчета масс агрегатов, а именно:

- полный расчетный КПД смеси;
- однородность энерговыделения в газе;
- максимальная расчетная электрическая мощность;
- максимальная расчетная тепловая мощность тепловыделения в газе.

Исходя из величины расчетных масс установки ЯОП с ОЯТ, выбираются варианты, позволяющие осуществить генерирование требуемой электрической энергии. В результате формируются требования к величинам удельной массы ее агрегатов и узлов.

На рисунке 4 приведен алгоритм системного проектирования на этапе массоэнергетического исследования.

Формирование проектного облика установки ЯОП ОЯТ представляет собой исследование вариантов массоэнергетического проектирования по различным критериям (конструкторским, технологическим, стоимостным и так далее) и выбор оптимальных значений из вариантов полей полученных решений. В результате формируется проектный облик установки ЯОП с необходимым составом агрегатов и их масс (в первом приближении) для заданного энергетического режима. После выбора требуемых выходных параметров (на этапе проектного облика) происходит уточнение результатов на этапе энергофизического и массоэнергетического проектирования.

Входными данными этапа “проектирования массово-габаритных и массово-центровочных характеристик” являются результаты масс агрегатов установки с ЯОП ОЯТ, полученные на этапе формирования проектного облика.

Выходными данными являются массово-габаритные и массово-центровочные характеристики этих же агрегатов:

- тип конструкции – “газгольдер”;
- диаметр газгольдера;
- количество загружаемых ампул с РАО;
- объем газгольдера;
- количество подводящих патрубков газовой смеси;
- количество отводящих патрубков газовой смеси;
- силовые элементы для крепления газгольдера;
- масса азотно-аргоновой смеси для прокачки;
- количество теплообменников;
- массогеометрические характеристики ФЭП Cu(In,Ga)Se_2 (CIGS);
- масса газгольдера с трубопроводами (подача и отвод газовой смеси).

Целью этапа “исследования и проектирования геометрических характеристик агрегатов установки ЯОП ОЯТ с учетом их теплового состояния” является исследование полей проектных решений геометрических характеристик активной зоны с учетом ее

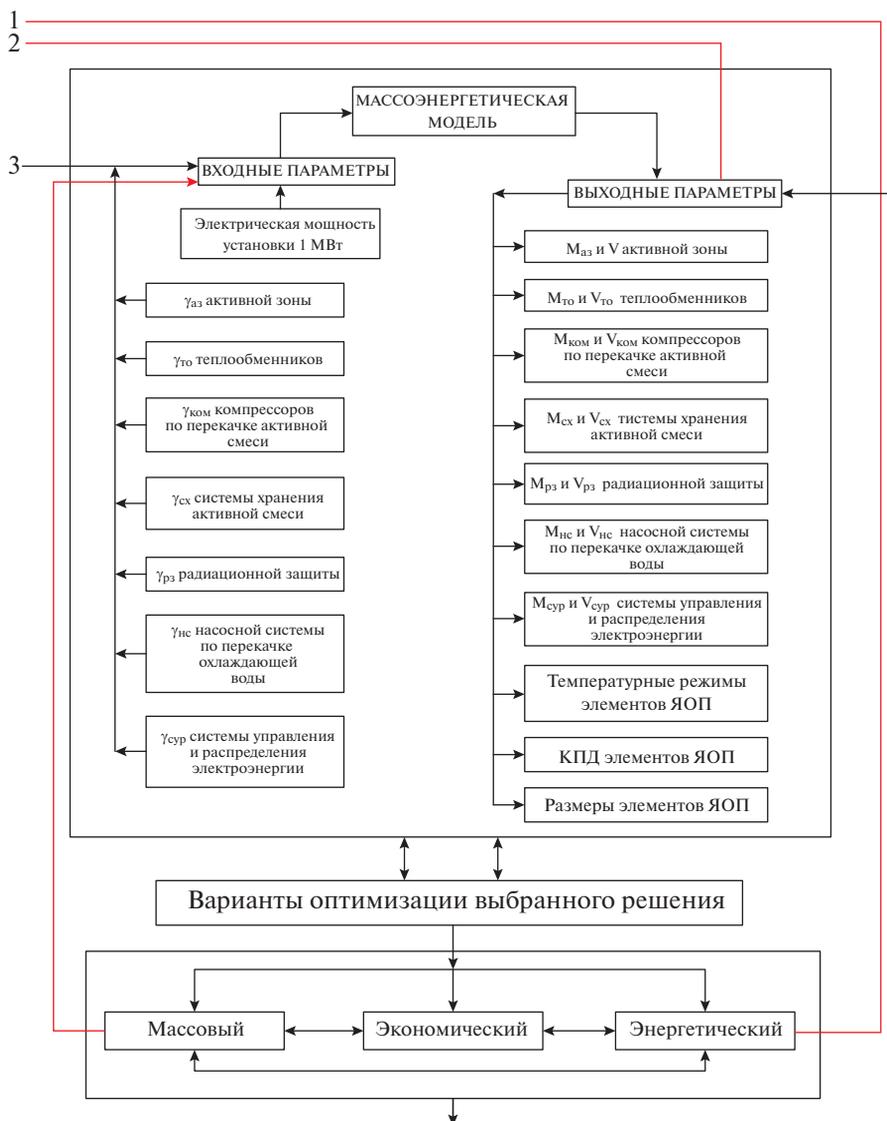


Рис. 4. Этап массоэнергетического проектирования: линия 1 – обратная связь по влиянию полученных энергетических решений на оптимальные выходные параметры ЯОП установки по утилизации РАО; линия 2 – обратная связь по влиянию выходных параметров массоэнергетической модели на оптимальные выходные параметры ЯОП установки по утилизации РАО; линия 3 – выходные параметры этапа энергофизического проектирования (являются входными параметрами для массоэнергетической модели).

теплого состояния, которое в значительной степени влияет на конструктивно-компоновочную схему установки ЯОП радиоактивных отходов.

В результате исследования теплового состояния активной зоны установки ЯОП ОЯТ происходит уточнение ее геометрических и массовых характеристик по этапу “проектирования массово-габаритных и массово-центровочных характеристик”.

По завершении данных этапов переходят к этапу внутреннего проектирования узлов и агрегатов энергоустановки с ЯОП ОЯТ.

Входными данными для построения трехмерной твердотельной модели конструктивно-компоновочной схемы установки ЯОП ОЯТ являются следующие результаты предыдущих этапов внешнего проектирования: величины массово-габаритных, массово-центровочных характеристик агрегатов и ее проектный облик.

Конструктивно-компоновочная схема представляет собой совокупность конструкторских решений, полученных на предыдущих этапах внешнего проектирования и реализованных в трехмерной твердотельной модели, построенной в пакете трехмерного моделирования “SolidWorks” [10, 14] (“ProIngenier”, “Unigaficks”).

Результатом проектирования является трехмерная твердотельная модель конструктивно-компоновочной схемы установки ЯОП ОЯТ, построенная в пакете “SolidWorks”. В результате построения конструктивно-компоновочной схемы происходит уточнение удельных масс агрегатов, за счет обратной связи величины γ вводятся в этап энергофизического и массоэнергетического проектирования, и осуществляется очередная итерация уровня внешнего проектирования.

Внутреннее проектирование подразумевает формирование технических решений по созданию трехмерной конечно-элементной (КЭ) модели конструктивно-силовой схемы установки ЯОП ОЯТ на основе результатов предыдущих уровней внешнего проектирования и исследование прочностных и жесткостных характеристик вариантов проектных решений трехмерной твердотельной модели конструктивно-компоновочной схемы с учетом теплонапряженного состояния узлов и агрегатов.

Для создания КЭ модели активной зоны установки ЯОП ОЯТ на этапе внутреннего проектирования используется пакет трехмерного конечно-элементного моделирования “MSC.Patran” [15–19] (универсальная интегрирующая среда для системного анализа, моделирования и проектирования). В качестве среды, в которой производится решение тепловых, прочностных и динамических задач, используется пакет “MSC.Nastran” [16–19] (комплексный пакет линейного и нелинейного анализа конструкций для решения тепловых, прочностных и динамических расчетов).

Внутренний уровень проектирования включает следующие этапы:

- создания трехмерной конечно-элементной модели конструктивно-силовой схемы;
- исследования прочностных и жесткостных характеристик “холодного” состояния активной зоны;
- исследования прочностных и жесткостных характеристик активной зоны при рабочих температурах;
- исследования прочностных и жесткостных характеристик в рамках полноценной электронной конечно-элементной модели установки ЯОП ОЯТ.

Входными данными для создания трехмерной КЭ модели конструктивно-силовой схемы являются: трехмерная твердотельная модель конструктивно-компоновочной схемы (созданная в системе твердотельного моделирования “SolidWorks”) и величины массово-габаритных и массово-центровочных характеристик агрегатов установки ЯОП ОЯТ, сформированные на уровне внешнего проектирования. Создание конструктивно-силовой схемы происходит по следующему принципу: производится экспортирование модели конструктивно-компоновочной схемы из системы твердотельного моделирования “SolidWorks” в систему конечно-элементного моделирования “MSC.Patran”.

На элементы конструкции, узлы и агрегаты накладываются характеристики свойств материалов. Проводится сравнение характеристик конечно-элементной модели (обратная связь на этапе внешнего проектирования). Для проведения расчетов к конечно-элементной модели прикладывается модель воздействия (модель нагрузок).

В пакете “MSC.Patran” КЭ модель установки ЯОП ОЯТ строится из групп, то есть, элементы конструкции, агрегаты и узлы находятся в одной модели, но разделены на группы. Для расчета прочностных и жесткостных характеристик “холодного состояния” используется пакет “MSC.Nastran”.

Входными данными для расчета прочностных и жесткостных характеристик ЯОП-установки с РАО является трехмерная КЭ модель конструкционно-силовой схемы, созданная в пакете “MSC.Patran” на предыдущем этапе внутреннего проектирования. Файл включает в себя КЭ модель, модель воздействия, условия закрепления и свойства материалов.

Пакет “MSC.Nastran” включает в себя два приложения:

- 1) тепловой анализ – “MSC.Nastran (Thermal)”;
- 2) прочностной и динамический анализ – “MSC.Nastran (Structural)”.

Так как расчет КЭ модели проводится без учета тепловых нагрузок, то используют приложение “MSC.Nastran (Structural)”.

Так как в установке ЯОП ОЯТ одним из главных элементов является активная зона, где происходит генерирование излучения при ядерной накачке и его преобразование в электричество с помощью ФЭП, необходимо провести ее исследование в рамках полноценной КЭ модели конструкционно-силовой схемы.

По результатам исследования необходимо провести оптимизацию массово-габаритных характеристик активной зоны установки ЯОП ОЯТ и учесть их влияние на нее в целом – в рамках полноценной КЭ модели конструкционно-силовой схемы.

Выходными данными являются: поля перемещений, деформаций, а так же собственные частоты и формы колебаний с учетом теплонапряженного состояния.

По полученным результатам происходит уточнение удельных масс агрегатов и узлов установки ЯОП ОЯТ, за счет обратной связи величины γ вводятся в этап энергофизического массоэнергетического проектирования, осуществляется очередная итерация уровня внешнего проектирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана система многоуровневого проектирования энергоустановок ядерно-оптического преобразования энергии на основе отработанного ядерного топлива в рамках единой электронной модели.

2. Представлены алгоритмы проектирования на этапах внешнего проектирования – энергофизического и массоэнергетического.

3. Показана методика внутреннего проектирования узлов и агрегатов энергоустановки ЯОП ОЯТ на основе пакета “MSC.Nastran”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мальковский В.И., Юдинцев С.В., Гупало В.С. Оценка безопасной изоляции твердых радиоактивных отходов в приповерхностных хранилищах // Атомная энергия, 2019. Т. 126. № 2. С. 102–108.
2. Баторшин Г.Ш., Кириллов С.П., Мясоедов Б.Ф. и др. Комплексное выделение ценных компонентов из техногенных радиоактивных отходов как вариант создания рентабельного ЗЯТЦ // Вопросы радиационной безопасности. 2015. № 3. С. 30–36.
3. МАГАТЭ. Информационная система по энергетическим реакторам (IAEA. PRIS). [Электронный ресурс] (Дата обращения 16.12.2019). <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx>
4. Ашурко Ю.М., Гулевич А.В., Клинов Д.А. и др. Реализация критериев для реакторных систем четвертого поколения в проекте БН-1200 // Атомная энергия, 2018. Т. 125. № 6. С. 311–318.
5. Карелин А.В., Хиблин И.Н., Амелин Л.А., Широков Р.В. Теплофизические ограничения ЯОП – установки для утилизации радиоактивных отходов // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП “НПП ВНИИЭМ”, 2010. Т. 117. № 4. С. 43–51.
6. Основные элементы Solid works. Solid works Russia. 2012. 550 с.
7. Большаков В., Бочков А., Сергеев А. 3D-моделирование в AutoCAD, КОМПАС-3D, Solid-Works, Inventor, T-Flex. 2011. 328 с.

8. Рыбников Е.К., Володин С.В., Соболев Р.Ю. Инженерные расчеты механических конструкций в системе MSC. Patran/Nastran. Ч. 1. 2003. 129 с.
9. Рыбников Е.К., Володин С.В., Соболев Р.Ю. Инженерные расчеты механических конструкций в системе MSC.Patran / Nastran. Ч. 2. 2003. 87 с.
10. Руководство пользователя по MSC.Patran. 2008. 162 с.
11. Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под. ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с. ISBN 5-283-04013-5
12. Карелин А.В. Физические основы реактора-лазера. М.: ФГУП "НПП ВНИИЭМ", 2007. 260 с.
13. Чолах С.И., Новоселов Ю.Н., Карелин А.В. Способ преобразования энергии излучения радиоактивных отходов в электрическую энергию. Патент № 2388087, регистр. (публ.) 27.04.2010 г. Бюлл. 12
14. MSC. Patran 2008 г. 1. Thermal User's Guide. 2008. 802 с.
15. MSC.PATRAN for Advanced Users. 2009. 112 с.
16. MSC/NASTRAN Basic Dynamic Analysis. 2008. 321 с.
17. MSC/NASTRAN Dynamic Analysis. Seminar notes. 2010. 148 с.
18. MSC/NASTRAN Quick Reference Guide.2008. 266 с.
19. MSC/NASTRAN Linear Static Analysis. User's guide. 2003. 792 с.

To the Question about Systems Engineering and Project the Image of Installing Nuclear-Optical Energy Conversion of Spent Nuclear Fuel

I. N. Khiblin^a, A. V. Karelin^b, V. V. Onufriev^{c,*}, and V. V. Sinyavsky^d

^a*Joint Company "Research and Production Company "Space Monitoring Systems, Information & Control and Electromechanical Complexes" named A.G. Iosifian, Moscow, Russia*

^b*FSUE Central Research Institute of Machine Building, Korolyov, Russia*

^c*Moscow State Technical University named N.E. Baumana, Moscow, Russia*

^d*Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolyov, Russia*

**e-mail: onufryev@bmtu.ru*

The accumulation of radioactive waste (RW) and spent nuclear fuel (SNF) requires the search for new ways to dispose of them in order to reduce their amount in the Earth's ecosystem. In this regard, a promising way is considered the utilization of radioactive waste with the use of nuclear optical conversion (NPS) of raw energy into electrical energy. The paper presents a system of multi-level design of power plant with nuclear-optical energy conversion based on RW (energy utilization). Levels of design, their interrelation and algorithm of design of power installation on the basis of uniform electronic model in the environment "MSC are considered. Patran". The results of the work can be useful in the development of installations with NPS.

Keywords: spent nuclear fuel, radioactive waste, multilevel design system, external level, internal design level, unified electronic model