

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА ДИНК

Бурков И.В., Жирнов А.П. (АО «НИКИЭТ», Москва, Россия)

Введение

В рамках работы по обоснованию предельной среднерадиальной энтальпии СНУП-топлива на базе исследовательского уран-графитового реактора (ИГР) РГП НЯЦ Республики Казахстан проведены экспериментальные пуски, в ходе которых получен значительный объем экспериментальных данных, включая показания датчиков штатной аппаратуры и положения органов регулирования СУЗ.

Полученные сведения представляют ценность для верификации программных средств и расчетных моделей, которые используются для обоснования ядерной безопасности на объектах использования атомной энергии.

В состав экспериментальных данных вошли сведения, в том числе об особенностях экспериментов и о физических процессах, выходящих за рамки области верификации используемых программных средств. Детальное исследование особенностей реактора не требуется в рамках определения предельной среднерадиальной энтальпии СНУП-топлива, однако представляет интерес для подробного описания процесса увеличения мощности в условиях быстрого ввода положительной реактивности. Важной характеристикой, которая напрямую влияет на поведение реакторной установки, является температура графитовых колонн, регистрируемая размещенными в них датчиками. Моделирование процесса изменения температур графита является основной целью программного средства (ПС) ДИНК.

ПС ДИНК представляет собой инженерный код, разработанный с использованием преимуществ объектно-ориентированного программирования на языке Python. Концепция кода включает в себя упрощенный подход к определению нейтронно-физических характеристик на базе уравнений точечной кинетики с учетом обратных связей и уравнения теплопроводности с использованием конечноразностного метода. ПС ДИНК позволяет использовать произвольное задание элементов расчетной модели, применять результаты эксперимента в качестве исходных данных при проведении расчетов и визуализировать результаты расчетного моделирования.

По результатам моделирования пусков оценены теплофизические параметры РУ ИГР, оценена температура графитовых колонн, а также установлена связь между положением и показаниями датчиков температур.

1. Описание ПС ДИНК

ПС ДИНК реализовано в виде консольного приложения на языке программирования Python. ПС решает уравнение точечной кинетики, одномерное и двумерное уравнения теплопроводности, а также контролирует баланс энергии в изолированной системе. Тепловой поток на границе модели отсутствует.

В расчете энерговыделения используется классическое уравнение точечной кинетики, учитывающее обратные связи по всем заложенным в модель параметрам [1]:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} N + \sum \lambda_i C_i + S_{\text{вн}}$$
$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} N - \lambda_i C_i$$

Интегральная мощность энерговыделения в модели реактора оценивается по формуле $P = 3 \cdot 10^{-11} \cdot N$ [1], которая впоследствии распределяется между элементами согласно долям, оцененным с учетом фотонного и нейтронного взаимодействия с помощью программного комплекса MCU-RBMK [2].

Состояние реактора определяется положением органов регулирования, веса которых заранее определены в качестве исходных данных расчета. Оценка реактивности системы осуществляется путем учета веса каждого органа и «холодного» состояния модели, в котором все органы погружены, по следующей формуле:

$$\rho = \rho_0 + \sum \rho_{j, t}^{\text{пер}} + \sum \Delta \rho_{j, T}^{\text{эле}} \quad (1)$$

Выделенная в элементах модели реактора энергия полностью расходуется на нагрев. Процесс теплопередачи и теплопроводности организован для различных элементов по-разному. Одномерное уравнение теплопроводности [3] используется для оценки температуры графитовых колонн. На краях колонн выполняется разнонаправленный конвективный теплообмен с теплоносителем реакторного пространства с заданным коэффициентом теплоотдачи. Система уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} cp \frac{dT}{dt} &= \lambda \frac{\partial T}{\partial z} + Q - q \\ q &= \alpha \cdot S_{\text{БОК}} \cdot (T_{\text{БЛ}} - T_{\text{He}}) \\ T_{z=\min} &= T_{\text{опоры}} \end{aligned} \quad (2)$$

Двумерное уравнение теплопроводности [3], решаемое конечноразностным методом по неявной схеме, используется для оценки температуры твэлов, ампулы, облучательного устройства и центрального экспериментального канала в цилиндрической системе координат. Система уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} cp \frac{dT}{dt} &= L(\lambda T) + Q \\ \lambda \frac{dT}{dr} &= \alpha \Delta T \\ T_{r=\max} &= T_{\text{He}} \end{aligned} \quad (3)$$

Режим теплоотдачи с поверхности идентичен одномерному случаю.

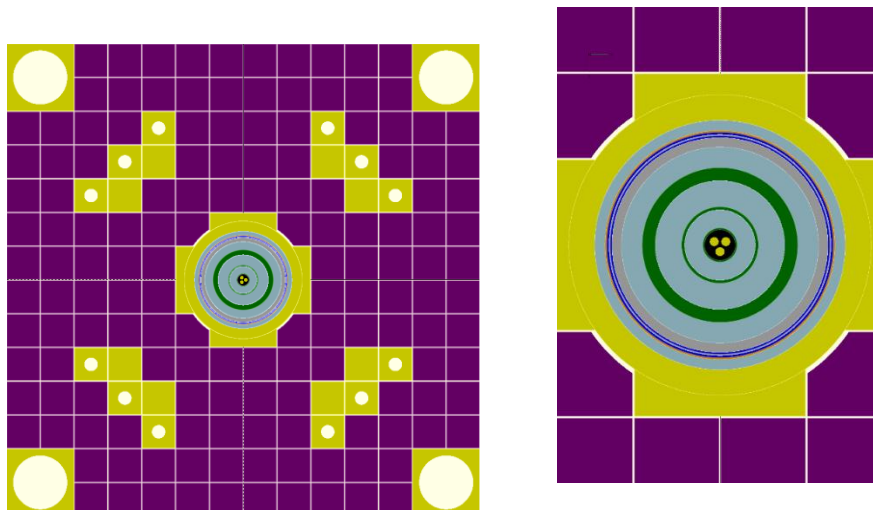
2. Задание модели

Реактор ИГР – гомогенный уран-графитовый реактор теплоемкостного типа с графитовым отражателем. Реактор предназначен для получения высокой плотности потоков нейтронов и гамма-излучения и служит для исследований в области ядерной физики, активационного анализа, биологии и техники реакторов.

Реактор ИГР имеет цилиндрический стальной корпус диаметром 3100 мм и высотой 4500 мм. Корпус находится внутри стального бака диаметром 4500 мм. Зазоры между корпусом и баком заполнены водой, обеспечивающей съём тепла. В корпусе смонтирована кладка реактора, которая состоит из графитовых колонн высотой 4400 мм. Кладка разделена на активную зону и отражатель. Форма активной зоны близка к кубической и имеет размеры 1400×1400×1400 мм.

Активная зона (рис. 1 и 2) собрана из графитовых блоков высотой 133 мм, пропитанных высокообогащенным ураном. Всего имеется 147 колонн с пропитанными ураном блоками и 21 непропитанная колонна. Кладка активной зоны разделена на подвижную и неподвижную части. При опускании подвижная часть входит в полость нижнего отражателя. В штатном верхнем положении подвижной части кладки средние горизонтальные плоскости подвижной и неподвижной частей кладки совпадают. При опускании подвижной части кладки на 1061 мм она устанавливается в штатное нижнее положение. Боковой отражатель собран из колонн площадью 98×98 мм² и 195×195 мм² (с шагом 100 мм или 200 мм соответственно) и имеет периметр, близкий к

окружности. Некоторые колонны имеют отверстия, предназначенные для термопар и источников нейтронов. Три отверстия диаметром 15 мм и глубиной 2457 мм. Четыре больших отверстия диаметром 11 см и глубиной 2295 мм в графитовых колоннах отражателя размерами 195×195 мм для размещения в них уравнивающих поглощающих стержней УС1, УС2, УС3 и бокового экспериментального канала (БЭК). В кладке реактора имеется ЦЭК диаметром 290 мм.



*Рис. 1. Расчетные модели активной зоны ИГР и ЦЭК:
желтый – графитовая кладка, фиолетовый – уран-графитовая кладка,
синий – вода, зеленый – сталь, серый – алюминий, оранжевый – цирконий*

Во внутрь крестообразной графитовой втулки канала ЦЭК помещена трехстенная неподвижная ампула (НА-228) внутренним диаметром 228 мм и высотой 3740 мм, имеющая тракт водяного охлаждения и служащая для размещения экспериментальных изделий, элементов и образцов. ЦЭК образован графитовой втулкой крестообразного сечения, установленной по оси подвижной части кладки. На дно центрального экспериментального канала может быть установлена нижняя графитовая пробка размерами D29×H450 мм.

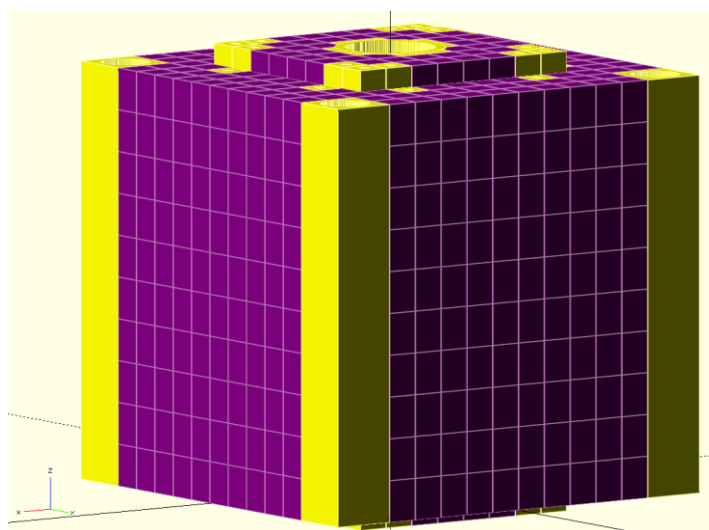


Рис. 2. Расчетная модель активной зоны ИГР (изомерия)

ИГР набран из множества графитовых колонн различного материального состава. Активная зона реактора набрана из пропитанных графитовых блоков и включает три зоны: подвижная часть (ПЧК), неподвижная часть (НЧК) и примыкающие к НЧК блоки (ПНЧК). Отражатель реактора выполнен аналогично с использованием непропитанного графита. Профилирование активной зоны выполнено для выравнивания поля энерговыделения путем варьирования концентрации пропитки. Расчетные модели реактора и колонн представлены на рис. 3.

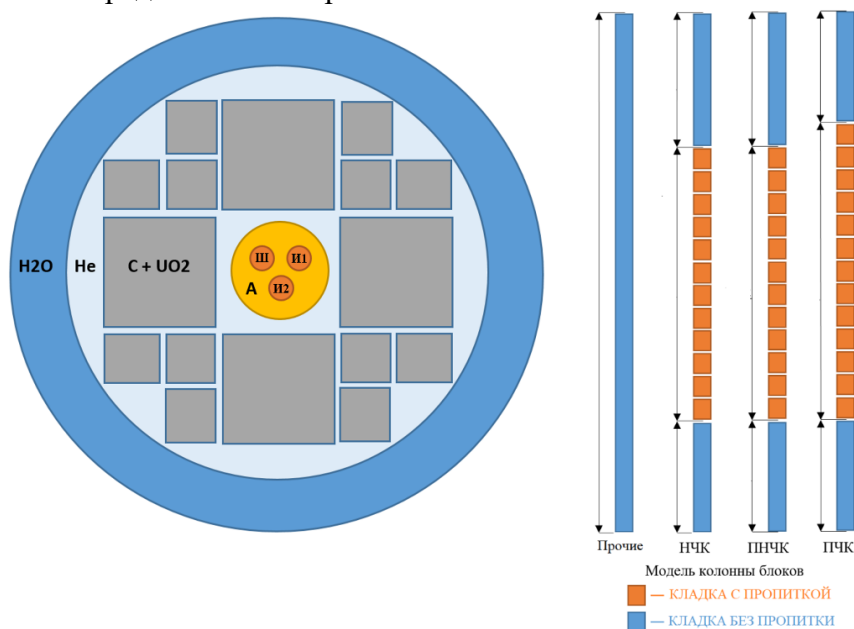


Рис. 3. Расчетная теплогидравлическая схема модели реактора ИГР
(А – ампула, III – штатный твэл, II1, II2 – инструментированные твэлы)
и модели графитовых колонн

Реактор не имеет системы принудительного охлаждения. Вся энергия, выделяющаяся в активной зоне при работе реактора, аккумулируется кладкой реактора и, вследствие этого, длительность его работы на мощности определяется предельно допустимым энерговыделением в активной зоне.

3. Описание расчетного сценария

Для определения ПСЭ СНУП-топлива проведено три пуска в режиме работы реактора «вспышка» на разных уровнях мощности. Цель пусков – определение значений энтальпии ядерного топлива: первого, соответствующего работоспособности твэла, и второго, соответствующего сохранению целостности твэла. Третий пуск, соответствующий разрушению твэла, не рассмотрен в данной работе. По разнице давлений в измерительном твэле и ампуле осуществлялся контроль герметичности измерительных твэлов, что экспериментально может говорить об области нахождения ПСЭ СНУП-топлива. Исходя из полученных результатов, можно сказать, что область нахождения предельной энтальпии находится в интервале вводимой реактивности $1,90 \div 2,33 \beta_{эф}$ реактора ИГР. Характеристики пусков приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики пусков

Название параметра	Пуск 1	Пуск 2
Полное энерговыделение, МДж	315,0	394,0
Мощность в пике, МВт	288,0	615,0
Начальный скачок реактивности, $\beta_{эф}$	1,9	2,33

4. Результаты моделирования сценария

Экспериментальные пуски на ИГР выполнены в 2021 г. с использованием облучательных устройств. Изменение мощности реактора в пусках представлено на рис. 4. Сравнение результатов моделирования пусков с показаниями датчиков представлено на рис. 5 и 6.

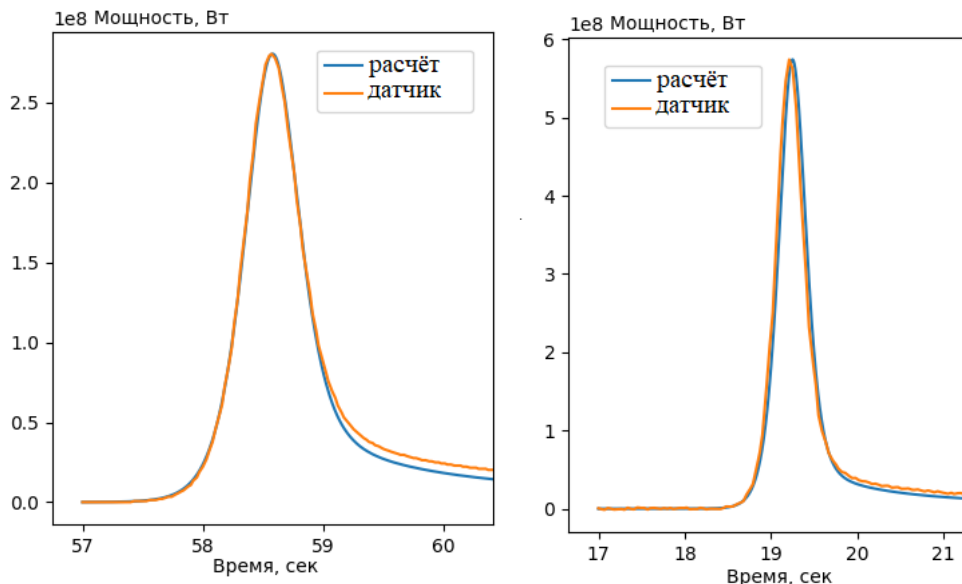


Рис. 4. Изменение мощности реактора в пусках 1 и 3

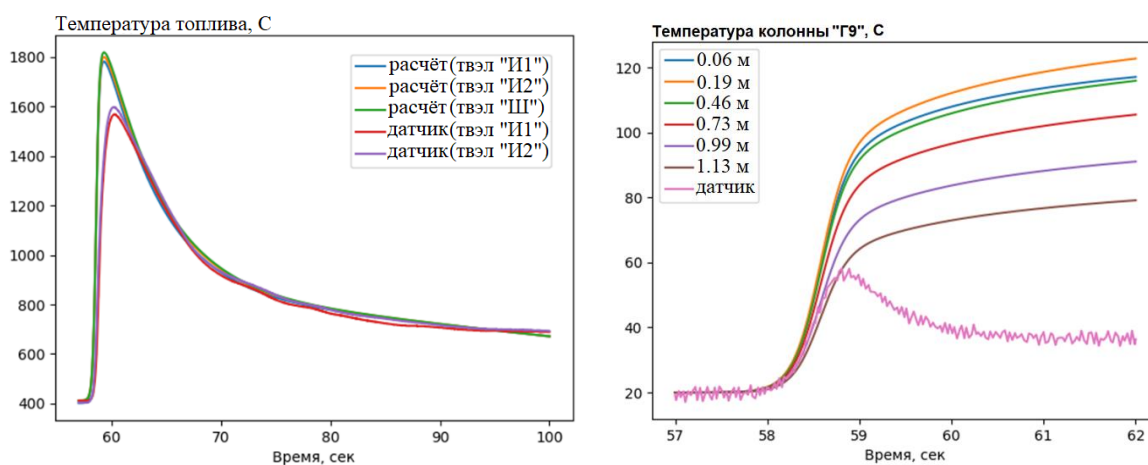


Рис.5. Температура топлива и графитовой колонны в пуске 1

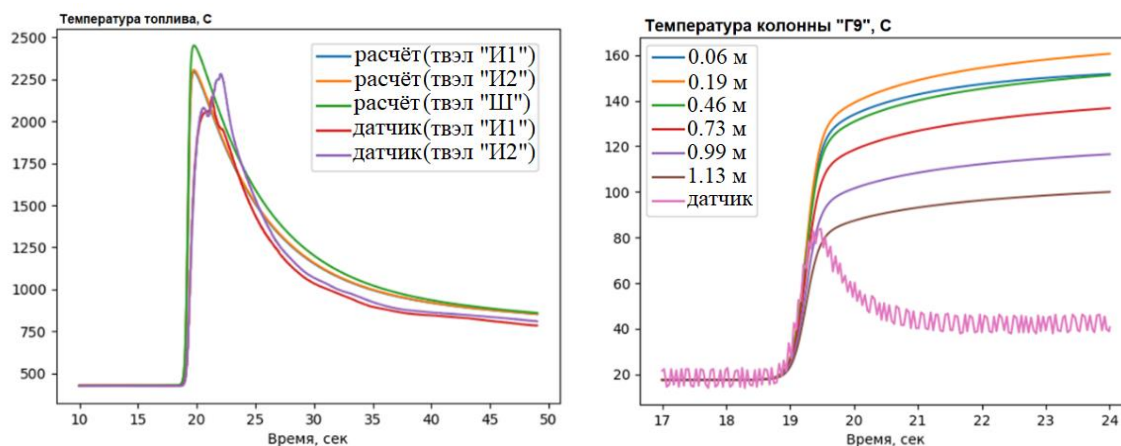


Рис.6. Температура топлива и графитовой колонны в пуске 3

Заключение

В рамках работы по обоснованию предельной среднерадиальной энтальпии СНУП-топлива разработано ПС ДИНК, которое позволило более подробно исследовать отдельные физические процессы и явления, исследование которых затруднено с использованием общепринятых методов и имеющихся программных средств. По результатам расчетного моделирования с использованием ПС ДИНК оценены температуры графитовых колонн и получена информация об особенностях работы установки.

Оцененные нейтронно-физические характеристики пусков на реакторе ИГР находятся в удовлетворительном согласии с экспериментом. Температура графитовых колонн удовлетворительно согласуется с показаниями датчика в процессе разогрева вплоть до начала процесса расхолаживания перегретой части кладки. Дальнейшее изменение температуры колонн повторить не удалось.

При разработке ПС ДИНК использованы современные подходы к созданию программного обеспечения, позволяющие производить масштабирование области применимости и предоставляющие возможность интеграции кода в более сложные проекты.

Список литературы

1. *Попов А.К.* Основы управления ядерным реактором: Учебное пособие / Московский государственный университет – М., 2012. – 208 с.
2. АО «НИКИЭТ». РБМК-От-1652 Верификация ПС MCU-RBMK с первым каналом подготовки исходных данных GENIFER. Верификационный отчет, инв. № 211-001-11623, М. 2016.
3. *Самарский А.А.* Введение в численные методы. – М.: Наука, 1987.