

РАСЧЕТНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ СОЗДАНИЯ АПЕРИОДИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ РЕАКТОРОВ

MATHEMATICAL MODELING OF DEVELOPMENT OF PULSE REACTOR

В. Б. Гречушкин, В. Ф. Колесов, В. Х. Хоружий.
V. B. Grechushkin, V. F. Kolesov, V. Kh. Khoruzhiy

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров Нижегородской обл.

Federal Nuclear Center of Russia – All-Russian Research Institute of Experimental Physics

В данном докладе представлен обзор расчетных методик, применяемых при проектировании импульсных реакторов. Рассмотрено два этапа расчета реакторов:

- 1. Расчет статических параметров реакторов с помощью метода Монте-Карло.*
- 2. Расчет динамики импульса с применением уравнений нейтронной кинетики в точечном приближении, функционала возмущений реактивности и термоупругих смещений элементов, рассчитанных методом конечных элементов, либо по аналитическим формулам.*

The scope of computational methods used during designing of pulse reactors is given in the following report. Two stages of development are under consideration:

- 1. Study of static reactor parameters using Monte-Carlo methods.*
- 2. Study of pulse dynamics using point approximation of neutron kinetics, functional of disturbance of reactivity and element displacement calculated by terms of analytical solutions or using finite element method.*

История создания импульсных реакторов началась с известного инцидента на крит. Сборке Godiva, когда аварийный переход в надкритическое состояние по мгновенным нейтронам привел к возникновению вспышки делений, которая, тем не менее, не привела к разрушению установки, а прекратилась за счет самогашения в результате теплового расширения. Инцидент показал, что возможна генерация коротких импульсов цепной реакции деления, в результате которой испускается поток излучения, сходных по свойствам с проникающей радиацией при срабатывании ядерной бомбы.

Таким образом, возник новый класс установок, моделирующих воздействие ядерного взрыва – импульсные реакторы. Типичный импульсный реактор представляет собой активную зону (АЗ), выполненную из легированного (обычно молибденом) урана, уран-графитового топлива или емкости с раствором солей урана (см. рис. 1)[1,2].

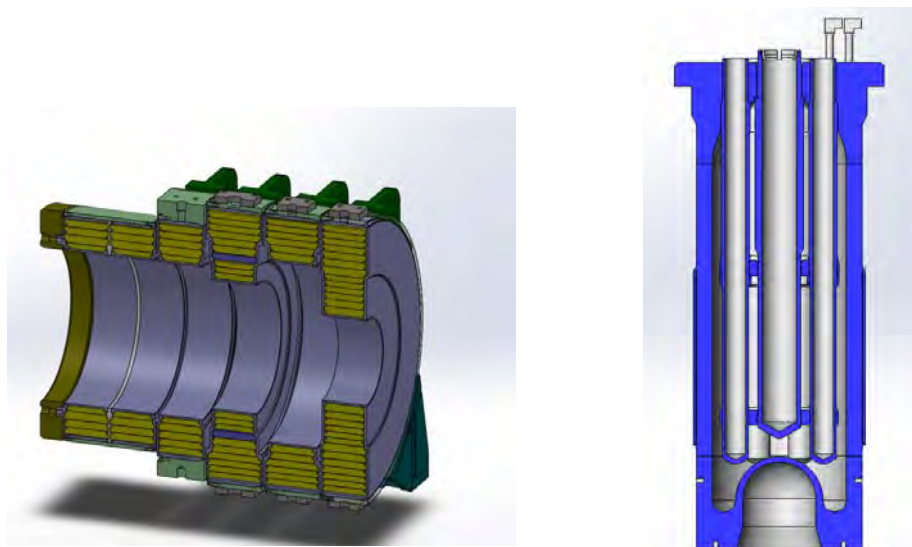


Рис. 1. Импульсные реакторы с металлической активной зоной БР-К1(слева) и растворного типа ВИР-2М (справа)[1, 2]

АЗ переводится в надкритическое состояние по мгновенным нейтронам путем ввода импульсного блока из делящегося материала либо удаления поглощающего блока, в результате чего генерируется импульс делений, гасящийся за счет теплового расширения в твердой активной зоне, либо за счет испарения раствора в жидкой активной зоне. Длительность импульса варьируется от 30-50 мкс для наиболее компактных реакторов с металлической АЗ, до нескольких миллисекунд для больших уран-графитовых и растворных реакторов.

Разработку импульсного реактора можно разделить на несколько этапов. На первом этапе на основе геометрических характеристик облучаемых объектов и требований к импульсу (длительность, флюенс, доза) определяется облик установки: цилиндрическая или сферическая компоновка активной зоны, наличие и размеры центральной полости для облучения.

Далее производится расчет статических нейтронно-физических характеристик установки. Чаще всего применяется метод Монте-Карло, одной из лучших реализаций которого является программа С-007 производства ВНИИЭФ[3]. Она позволяет определить конфигурацию, в которой установка достигает критичности ($K_{эф} = 1$), пространственное распределение плотности делений по активной зоне и характеристики излучения в заданных точках вокруг реактора. Программа С-007 выдает характеристики установки отнормированные на акт деления в активной зоне, но их легко перенормировать, зная массу и тепловые свойства топлива, а также распределение делений по объему активной зоны. Этот же метод позволяет оценить влияние органов регулирования и генерации импульса на реактивность установки и откалибровать их. Современный уровень развития вычислительной техники позволяет рассчитать распределение энерговыделения по реактору со статистической точностью до десятых долей процента, а крит. параметры установки с точностью до сотых или даже тысячных долей процента за один рабочий день. Точность результатов, полученных методом Монте-Карло, зависит только от детальности описания установки в модели и точности ядерных констант.

После расчета статических характеристик установки проводится расчет динамических характеристик и моделирование импульса. Все нижеописанные методики расчета относятся к реакторам с твердой активной зоной.

Требования к минимальной полуширине импульса и нелинейно растущие с размером деталей термомеханические напряжения в них определяют то, что абсолютное большинство импульсных реакторов – компактные установки с размером активной зоны в несколько десятков сантиметров. Динамика импульса таких установок хорошо описывается при использовании нижеприведенных уравнений нейтронной кинетики в точечном приближении(1) совместно с численным или аналитическим описанием динамики смещения элементов и вызванного им изменения реактивности.

$$\begin{cases} \Lambda \frac{dP(t)}{dt} = P(t) [\rho(t) - \beta_{эфф}] + \sum_m \beta_m C_m(t) \\ \frac{dC_m(t)}{dt} = \lambda_m [P(t) - C_m(t)] \\ \frac{dY(t)}{dt} = P(t) \end{cases}, \quad (1)$$

где Λ – время генерации в системе, $P(t)$ – мощность установки, $\rho(t)$ – реактивность, β_m , C_m и λ_m – доли, концентрации(в единицах мощности) и постоянные распада источников запаздывающих и/или отраженных нейтронов, $Y(t)$ – энерговыделение.

Реактивность $\rho(t)$ вычисляется по аналитическим формулам, функции влияния, либо по коэффициенту гашения, в зависимости от того, как рассчитываются смещения элементов и имеют ли значения инерциальные эффекты и термоупругие колебания в данной установке.

Аналитические формулы определяются геометрией элементов АЗ и индивидуальны в каждом конкретном случае, поэтому приводить их в докладе не имеет смысла. К сожалению, в удобном для применения виде они существуют только для простых геометрических объектов, таких, например, как тонкие цилиндрические и сферические оболочки.

Использование аналитических решений накладывает на точность расчета ограничения. Форма описываемых объектов при таком подходе сильно упрощена, а взаимодействие элементов активной зоны друг с другом и с элементами конструкции вообще не рассматривается.

С развитием численных методов появилась возможность рассчитывать смещения элементов, вызванные их нагревом, методом конечных элементов. Для этого могут применяться как зарубежные программы, например ANSYS LS-DYNA, так и их отечественные аналоги, такие как ЛЭГАК-ДК[4], разработанный во ВНИИЭФ.

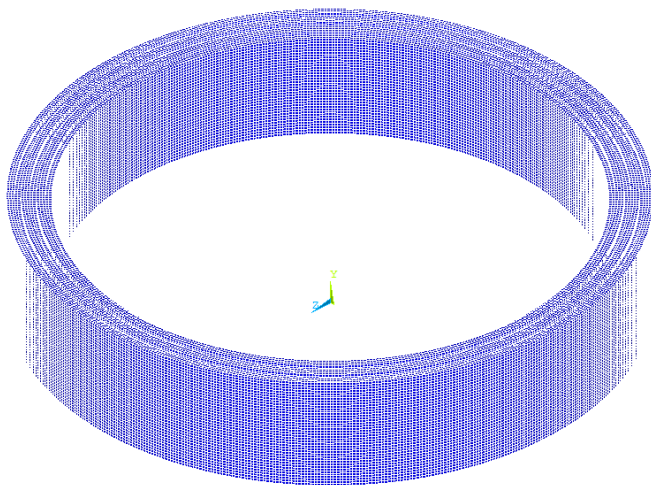


Рис. 2. Трехмерная модель нескольких колец реактора БР-К1 с разбиением на сетку конечных элементов, выполненная в программе численного моделирования

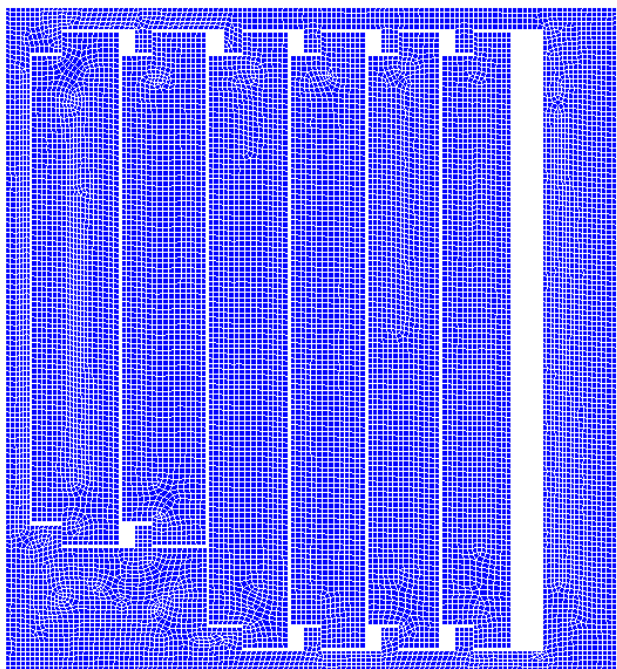


Рис. 3. Двухмерная осесимметричная модель диска с чехлом (размер элемента 0,5 мм)

В этих программах, в зависимости от геометрии установки, можно создать ее осесимметричную двумерную или полную трехмерную модель, как показано на рис. 2–3. Для моделирования реакторного импульса делений вводится распределение импульсного изменения температуры в АЗ со значением её в месте наибольшего разогрева 1°C и для этого распределения температур с помощью указанных программ рассчитывается распределение термоупругих смещений по среде АЗ $\bar{u}_0(\bar{r}, t)$. Далее, получим зависимость от времени изменения реактивности $\Delta\rho_0(t)$, вызванное скачком температуры [5]

$$\Delta\rho^0(t) = \int_{V_{A3}} \bar{u} \nabla w(\bar{r}) d\bar{r}, \quad (1)$$

где $w(\bar{r})$ – функционал возмущений реактивности, вычисляемый в программе САТУРН[6], V_{A3} – объем АЗ.

В итоге находим зависимость от времени изменения реактивности $\Delta\rho$:

$$\Delta\rho = \int_0^t \Delta\rho^0(t-\eta) \Theta(\eta) d\eta, \quad (2)$$

где $\Theta(t)$ – температура активной зоны в точке ее наибольшего разогрева.

Функция $\Delta\rho_0(t)$ может иметь произвольную форму и если не использовать обходными приемами, то интеграл (2) необходимо рассчитывать на каждом шаге счета системы уравнений динамики, что может негативно сказаться на скорости расчетов. В случае недостатка вычислительных ресурсов, для того, чтобы избежать этого, предполагается, что импульсы делений реактора рассчитываются на участке от 0 до Т и функцию $\Delta\rho_0(t)$ можно разложить в ряд Фурье в виде суммы синусов или косинусов без потери точности. В этом случае интеграл (2) сводится к обыкновенным дифференциальным уравнениям, решаемым совместно с другими уравнениями динамики.

В этом представлении $\Delta\rho_0(t)$ система принимает обычный вид, характерный для случая использования аналитических решений задач термоупругости и так же легко решается численно [5].

Вышеописанный сложный математический алгоритм необходим в установках с достаточным коротким импульсом. В этом случае расширение элементов отстает от их нагрева в силу инерции и в них возникают термоупругие колебания, оказывающие значительное влияние на форму импульса. Инерциальное запаздывание становится малозаметным при ширине импульса на половине максимума мощности (далее полуширине) около 0,1–0,3 мс. Чем меньше радиус элемента, тем короче должен быть импульс, чтобы возбудить в нем колебания. При полуширине импульса выше указанных значений можно принять, что смещение и изменение реактивности напрямую связано с нагревом и энерговыделением и внести его просто как коэффициент гашения a' в уравнении:

$$\Delta\rho(t) = -Y(t) \cdot a' \quad (3)$$

При расчете установки, применительно к конкретному залу, часто требуется учесть отраженные нейтроны. Для этого в запаздывающие нейтроны добавляют дополнительные группы, значения долей и времен жизни которых рассчитываются.

На этом же этапе, когда после оптимизации статических параметров становится известно пространственное распределение энерговыделения, а из целевых параметров системы – требуемая полуширина импульса, необходимо оценить напряжения, возникающие в конструкции установки во время и после импульса. Как показывает опыт разработки установок, наибольшую опасность представляют динамические напряжения в элементах активной зоны во время импульса. Как правило, напряжения в чехлах, не подвергающихся непосредственному нагреву во время импульса, намного меньше, чем в элементах активной зоны, а конструкционные материалы намного прочнее урановых сплавов.

На втором месте стоят квазистатические напряжения, возникающие в чехлах в процессе остывания установки. Как показывает опыт физического пуска БР-К1, который рассмотрен на одном из докладов конференции, они могут приводить к значительным деформациям чехлов, короблению, блокировке подвижных блоков установки и даже угрожать разрушением чехлов и окислением элементов АЗ.

Для моделирования используются те же программы метода конечных элементов, что и при расчете термоупругих колебаний. В них на модель установки накладывается температурная нагрузка с пространственным распределением, полученным методом Монте-Карло и временным

распределением изменения температуры, повторяющим форму импульса реактора. Интегральное энерговыделение выбирается так, чтобы обеспечить необходимый флюенс, дозу или энерговод на облучаемом объекте, и не превысить максимально допустимую температуру топлива.

Поскольку при расчете импульса необходимо использовать трехмерное распределение энерговыделения в активной зоне и учитывать взаимодействие между ее элементами, точные результаты может дать только численное моделирование методом конечных элементов. Аналитические решения могут применяться для проверки физичности полученных результатов без учета взаимодействия между частями установки. Основным исследуемым параметром в данном аспекте является значение эквивалентного напряжения по Мизесу. Для того, чтобы избежать повреждения активной зоны, оно не должно превышать статического предела прочности материала активной зоны, а в идеале не должно выходить за рамки его предела текучести. Уран-молибденовые сплавы, чаще всего применяемые для изготовления АЗ импульсных реакторов, не пластичны. Они быстро разрушаются, выйдя за предел текучести.

Имеется опыт создания и успешной эксплуатации установок исходя из динамического предела прочности, превышающего статический в $\sim 1,8$ раза. Так была создана первая активная зона реактора БР-1. Опыт его эксплуатации показал, что после нескольких десятков импульсов полной мощности и нескольких сотен менее мощных ($1/2 - 3/4$ максимума) элемента АЗ растрескиваются и разрушаются.

Как показано на рис. 4, напряжения в элементах АЗ в основном обусловлены тремя факторами:

1. Столкновением элементов друг с другом и с чехлами
2. Быстрым нагревом и расширением и последующими термоупругими колебаниями
3. Перепадом температур внутри элемента.

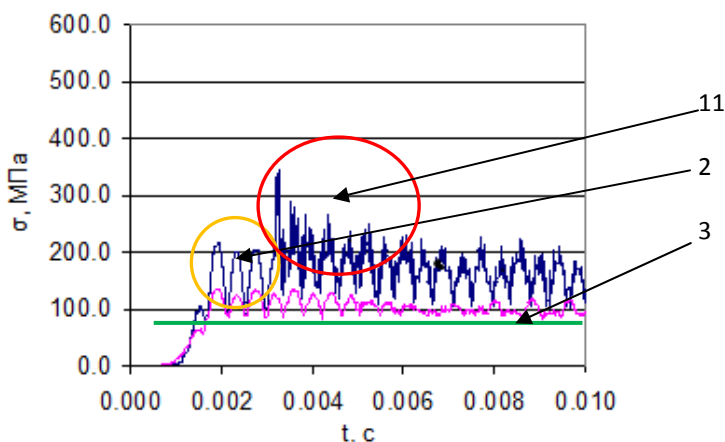


Рис. 4. Напряжения во время импульса с полушириной 400 мкс (—) и 600 мкс (—) в одном из блоков реактора БР-K1. 1 – пики, вызванные столкновениями элементов, 2 – осцилляции, вызванные термоупругими колебаниями 3 – постоянная часть напряжений, обусловленная перепадом температур в пределах элементов

Столкновения создают пики напряжений, зачастую превышающие напряжения от других факторов в 2–3 раза и определяющие максимальное значение напряжений в системе. Их необходимо устранять или минимизировать путем оптимизации размещения элементов, внесением в конструкцию зазоров и демпферов.

Быстрый нагрев производит термоупругие колебания, порождающие пики, похожие на функцию $|\sin(x)|$. Они исчезают только при большой полуширине импульса.

Перепад температуры внутри отдельно взятого элемента ответственен за постоянную часть напряжений. Её можно понизить, уменьшая размер отдельного элемента и размещая элементы так, чтобы распределение энерговыделения в пределах одного элемента сильно не изменялось.

Если после оптимизации конструкции напряжения превышают предельно допустимые значения, остается только снижать энерговыделение или уширять импульс реактора. Например,

результаты расчетов, проведенных в ходе модернизации БР-К1, представленные на рис. 5, показали, что уширение импульса с 400 до 600 мкс снижает напряжения более, чем в три раза.

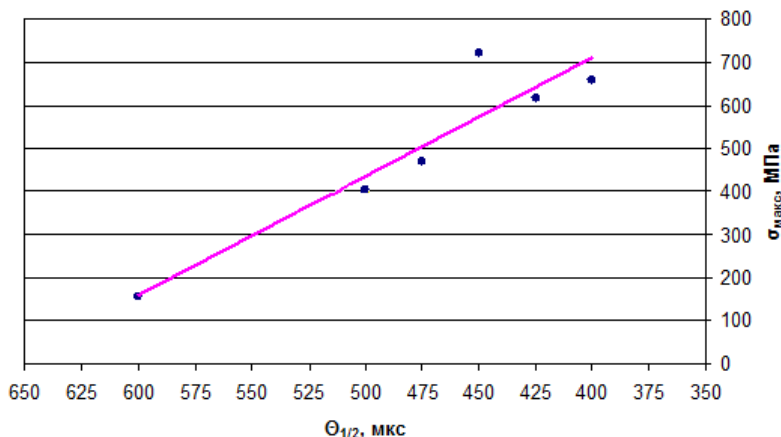


Рис. 5. Зависимость максимальных напряжений в одном из блоков реактора БР-К1 от полуширины импульса. Расчетные точки и линейная интерполяция

Таким образом, численные методы позволяют оценивать многие характеристики импульсного реактора

Список литературы

1. Девяткин А. А., Воронцов С. В., Колесов В. Ф., И.А. Никитин, Хоружий В. Х., Кошелев А. С., Гречушкин В. Б. Доклад на межотраслевой научной конференции «Импульсные ядерные реакторы: история создания и перспективы использования». Саров, ВНИИЭФ, 13–16.10.2015. Пути модернизации БР-К1 для работы в импульсном режиме.
2. Воинов А. М., Колесов В. Ф., Мавеев А. С. и др. Водный импульсный реактор ВИР-2М и его предшественники. ВАНТ. Серия Физика ядерных реакторов, 1990, вып. 3, с. 3–15.
3. Житник А. К., Донской Е. Н., Огнев С. П. и др. Методика С-007 решения методом Монте-Карло связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов, 2011, вып. 1, с. 17–24.
4. Рябов А. А., Величко С. В., Волков А. Ю. и др. Параллельный пакет программ ЛЭГАК-ДК для расчета задач газодинамики и прочности на неструктурированных сетках в лагранжево-эйлеровых переменных. Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского № 4-5/2011.
5. Колесов В. Ф., Гречушкин В. Б., Девяткин А. А., Интяпина Е. В. Динамика быстрого реактора с акцентом точного воспроизведения формы импульса мощности. ВАНТ. Серия Физика ядерных реакторов, 2008, выпуск 1, с. 24–28.
6. Шагалиев Р. М., Шумилин В. А., Алексеев А. В. и др. Математическое моделирование и методики решения многомерных задач переноса частиц и энергии, реализованные в комплексе САТУРН-3. ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов, 1999, вып. 4, с. 20–26.