

НЕСТАНДАРТНЫЕ ПОДХОДЫ К КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ТВС ЯЭУ

Чалый А.А., Столотнюк С.В. (АО «НИКИЭТ», Москва, Россия),
Сорокин Ф.Д. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия)

Введение

Рассмотрены подходы к численному моделированию тепловыделяющих сборок (ТВС), являющиеся актуальными с позиции оценки их прочности и динамических характеристик. Сложность моделирования ТВС ядерных реакторов в целом заключается в корректном описании контактных взаимодействий внутренних элементов сборной конструкции, в частности, количество контактных пар твэл – дистанционирующая решетка (ДР) и твэл-твэл могут достигать до 1500 и 1000 пар соответственно. При этом, для каждого конструкционного исполнения ТВС необходим свой подход по моделированию контактной пары, сохраняющий достоверность модели в целом с возможностью повышения ее точности на базе экспериментальных данных, а также повышающий качественный уровень расчетных методов оценки динамических характеристик ТВС.

В рамках настоящего доклада представляются подходы по описанию данных контактов для их последующего учета в расчетной модели.

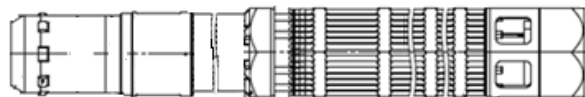
1 Описание конструкции

Традиционная конструкция ТВС состоит из каркаса и пучка тепловыделяющих элементов (твэлов). Твэлы установлены в каркас жесткости, который может состоять:

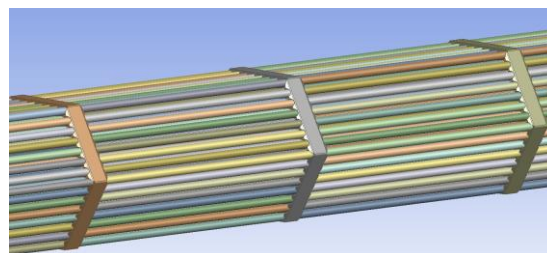
- из ДР, закреплённых на направляющих трубах каркаса, соединяющихся с головкой и хвостовиком ТВС при помощи резьбовых соединений;
- чехла с решеткой в виде пластин, установленных сверху и внизу пучка. Чехол в свою очередь посредством других составных элементов (трубы, переходников, втулок) соединен с головкой и хвостовиком ТВС при помощи резьбовых соединений.

В рамках доклада рассматриваются два варианта ТВС:

- 1) классический тип чехловая или безчехловой ТВС, где твэлы по треугольному закону расположены в ДР представляют из себя пучок, передающий нагрузку на всю ТВС через направляющие трубопроводы, проходящие через ДР и соединяющиеся с хвостовиком и головкой ТВС (см. рисунок 1);
- 2) нестандартные чехловые ТВС с твэлами некруглого профиля или оребренными, закрученными вокруг своей оси, способными самодистанционироваться относительно друг друга (в ТВС отсутствуют ДР). Твэлы также располагаются по треугольному закону и соединяются с другими частями ТВС на концах напрямую через опорные пластины или другие крепежные элементы (см. рисунок 2).



а)



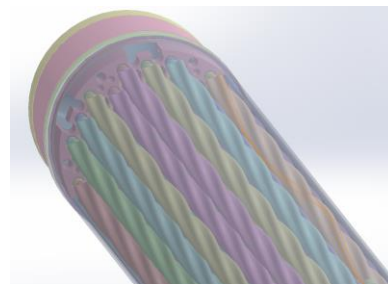
б)

Рис. 1. Пример классической безчехловой ТВС:

а) общий вид ТВС; б) крупный вид твэлов и ДР в составе 3D-модели



а)



б)

Рис. 2. Пример нестандартной чехловой ТВС:
а) общий вид ТВС; б) крупный вид спиральных твэлов в составе 3D-модели

2 Моделирование ТВС классического типа

Моделирование ТВС классического типа осложнено наличием большого количества контактных пар твэл-ячейка ДР (порядка 1500 пар). Прямое моделирование данной ТВС с настройкой контактного взаимодействия с трением представляется невозможным по временным и вычислительным затратам на одну итерацию. В связи с этим представляются два варианта моделирования данной ТВС.

Первый заключается в прямом моделировании контактного взаимодействия через модифицированный контактный элемент типа Bushing (см. справочник ANSYS). Контактный элемент устанавливает взаимосвязь между цилиндрической поверхностью твэла и контактной поверхностью ячейки ДР. Данный тип контактного элемента позволяет уменьшить трудозатраты и объем вычислений. Основная идея модели контакта заключается в создании аналога пружины со своей матрицей приведенной жесткости для шести степеней свободы тела (см. рисунок 3). Для применения данного контактного элемента необходимо получить матрицу приведенной жесткости из результатов экспериментов по определению жесткости ТВС. Настройка расчетной модели по результатам всевозможных экспериментов возможна посредством корректировки матрицы приведенной жесткости контактного взаимодействия.

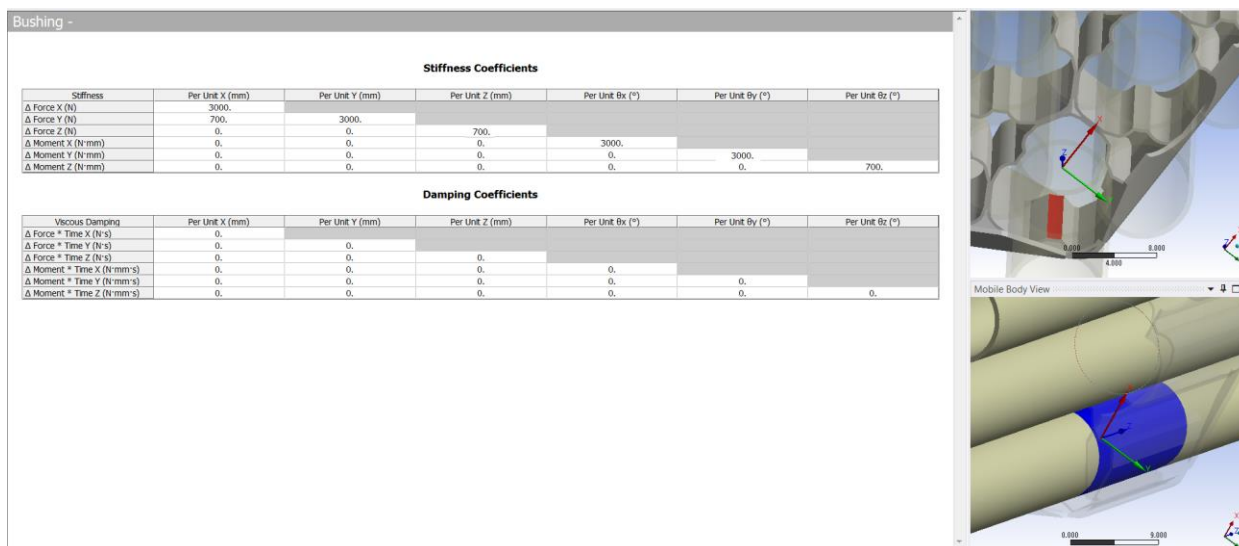


Рис. 3. Пример матрицы приведенной жесткости для контактного элемента Bushing

Вторым подходом по моделированию контактного взаимодействия между твэлами и ДР является использование балочной модели Сорокина [1]. Геометрия ТВС предварительно приводится к балочной с сохранением жесткостных и массовых характеристик ТВС посредством эквивалентного момента инерции и приведенной

массы. Контактное взаимодействие моделируется через пружину с приведенной жесткостью, полученной из численных и экспериментальных исследований контактного взаимодействия твэл-ячейка. Пример балочной модели представлен на рисунке 4.

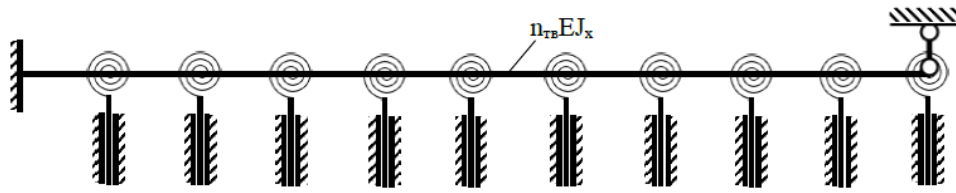


Рис. 4. Пример балочной модели Сорокина

ДР ведут себя как упругие элементы, реагирующие на наклон твэлов относительно их плоскости. Жесткость ДР при наклоне твэлов измеряется в Нм/рад (упругий момент делится на поворот). Если распределить жесткости ДР равномерно по длине всего пучка, то получится распределенная жесткость k с размерностью Нм/(рад·м). Именно эта распределенная жесткость входит в модель ТВС, как «балки Сорокина»:

$$A \frac{\partial^4 v}{\partial z^4} - k \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + (m + \Delta m) \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + b \frac{\partial v}{\partial t} = q, \quad (1)$$

где v — поперечное перемещение пучка; z — продольная координата; t — время; A — суммарная жесткость сечений всех твэлов и направляющих каналов ТВС; k — распределенная жесткость ДР; m — удельная суммарная масса всех твэлов и направляющих каналов ТВС; Δm — удельная присоединенная масса; b — удельный коэффициент демпфирования; q — поперечная распределенная или сосредоточенная нагрузка. Величины Δm , b , k , q находились экспериментально, при этом k контролировалась МКЭ, а Δm — методом конечных объемов.

3 Моделирование нестандартной ТВС

Моделирование ТВС с витыми твэлами осложнено описанием контактов между твэлами. Через определенный шаг завивки зазор между твэлами достигает минимума и интерпретация данного зазора в рамках модального анализа возможна двумя вариантами:

- закрепления всех твэлов в сечении, где зазор минимален;
- создание пружинных контактов в определенных направлениях между твэлами.

Наиболее перспективным является второй вариант моделирования в силу возможности его реализации до настройки расчетной модели по результатам экспериментальных данных. Поперечное сечение твэлов было упрощено и заменено на трубу, размеры которой подбирались из условия равенства жесткости и массово-инерционных характеристик исходному сечению. Пример сечения модели с пружинными контактами показан на рисунке 5.

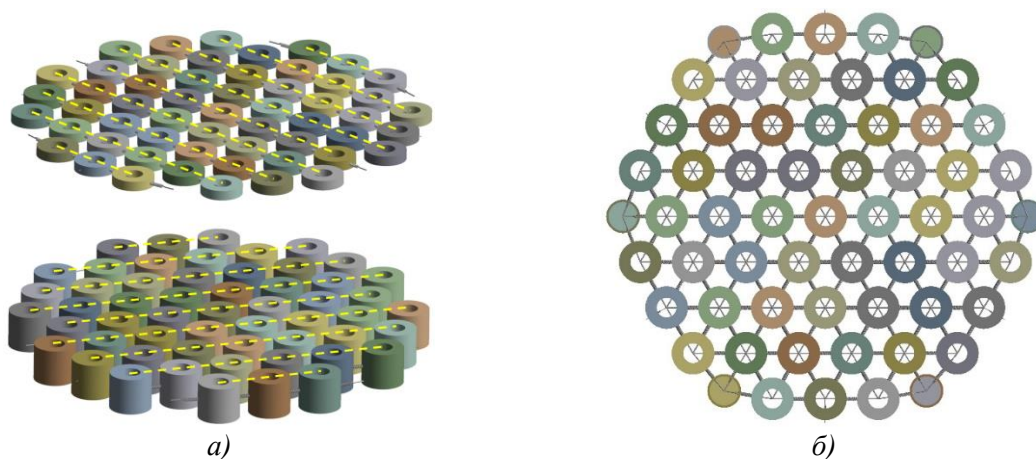


Рис. 5. Изображение связей между твэлами:
а) изометрия; б) вид сверху

Усредненные значения жесткости пружин определялись из расчета жесткости конструкции. При приложении к твэлу силы оценивалось перемещение сечения и, таким образом, определялась приведенная локальная жесткость. Данная величина может уточняться по результатам экспериментальных исследований динамических характеристик конструкции.

Заключение

Нестандартные способы моделирования ТВС нашли широкое применение в задачах оценки динамических характеристик ТВС, выполняющихся перед экспериментами. Предварительная оценка динамических характеристик ТВС позволяет назначать точки контроля конструкции для получения более информативной картины деформирования. По результатам экспериментальных значений проводится доработка и верификация модели для последующего прогноза поведения конструкции.

Используемый источник

Развитие стержневой модели тепловыделяющей сборки ядерного реактора / Ф.Д. Сорокин, В.В. Перевезенцев, А.А. Чалый // Проблемы прочности, пластичности и устойчивости в механике деформируемого твердого тела. Материалы IX Международного научного симпозиума, посвященного 90-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники РФ профессора В.Г. Зубчанинова. Под редакцией В.Г. Зубчанинова, А.А. Алексеева, В.И. Гуляева. с.78–82, Тверь, 2021.