

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОСИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТОПЛИВНЫЙ СЕРДЕЧНИК ТВЭЛА АКТИВНОЙ ЗОНЫ АЭС

Докт. физ.-мат. наук, проф. КУЛИКОВ И. С., асп. ШИРВЕЛЬ П. И.

Белорусский национальный технический университет

В настоящее время, наряду с традиционными способами производства электроэнергии в мире широкое распространение получили атомные электростанции (АЭС). Эффективность их работы послужила главным аргументом проекта строительства АЭС на территории Республики Беларусь и начала развития собственной ядерной энергетики. Современная нормативно-техническая документация, разработанная Госатомнадзором РФ, атомными агентствами США, Франции, Японии, и рекомендации МАГАТЭ предъявляют жесткие требования к обеспечению безопасности АЭС. Одним из главных факторов, определяющих работоспособность ядерного реактора [1], являются температурные условия работы его тепловыделяющих элементов (ТВЭлов). Жесткость условий их работы (большие тепловые и радиационные нагрузки, высокое внешнее давление теплоносителя) предполагает повышенные требования. В связи с этим возрастает роль теплофизических и прочностных расчетов элементов активной зоны реактора [2], повышаются требования к их точности. Таким образом, проблема расчета и анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) топливного элемента активной зоны реактора является актуальной с точки зрения прогнозирования ресурса и безопасности работы любой АЭС. Цель данной статьи – исследование поведения длинных сплошных тел цилиндрической геометрии, подвергаемых неравномерному нагреву и силовому воздействию. Основная задача исследования – моделирование термосилового воздействия и определение НДС в названных выше системах и использование этой модели для численного анализа поведения топливного стержня ТВЭла активной зоны реактора. Область применения рассматриваемых вопросов – расчеты механики деформируемого твердого тела для материалов и элементов конструкций ядерной энергетики.

Отметим, что тепловыделяющие элементы реактора АЭС представляют собой устройства, содержащие твердое ядерное горючее и обеспечивающие при помещении их в активную зону реактора цепную реакцию деления и генерацию тепловой энергии. Типовой ТВЭЛ с твердым ядерным топливом (рис. 1) представляет собой ци-

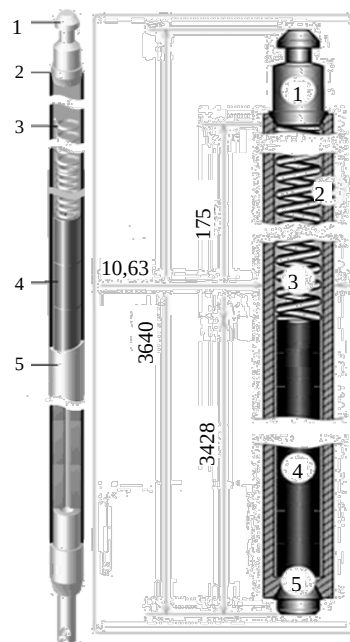
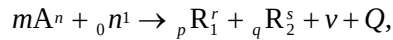


Рис. 1. Тепловыделяющий элемент: 1 – наконечник; 2 – оболочка; 3 – пружинный фиксатор; 4 – топливный сердечник; 5 – заглушка

линдрический стержень. Основу тепловыделяющего элемента составляет активный объем, в котором помещаются ядерное горючее (сердечник твэла). Топливный сердечник имеет форму длинного ($h \gg d$) сплошного цилиндра и включает в себя ядерное горючее (например, ^{235}U , ^{233}U , ^{239}Pu). При работе реактора в тепловыделяющих элементах происходят два основных ядерных процесса: деление содержащегося в твэлах ядерного горючего и радиационный захват нейтронов в топливных и конструкционных материалах. Процесс деления схематически можно представить следующей реакцией:



где $m\text{A}^n$ – делящийся изотоп; ${}_0n^1$ – нейтрон, вызывающий деление; ${}_p\text{R}_1^r, {}_q\text{R}_2^s$ – продукты деления (осколки); ν – число нейтронов, образующихся при делении; Q – высвобождающаяся энергия. В результате процесса деления в тепловыделяющих элементах происходят следующие явления: образование новых атомов в виде осколков деления; испускание нейтронов, β - и γ -излучение; высвобождение тепловой энергии; расходование или выгорание ядерного горючего.

Как известно, одной из причин появления напряжений в сплошном теле является именно неравномерный нагрев. Твэлы активной зоны реактора работают при высоких температурах. Поэтому расчетно-теоретическое определение НДС твэлов включает, в первую очередь, определение температурных полей и возникающих термонапряжений. При этом предполагаем, что теплофизические и механические характеристики материала остаются неизменными (или меняются в соответствии с полем температуры). Это относится и к прочностным свойствам материала. Абсолютное значение и характер распределения поля температуры определяются мощностью внутреннего тепловыделения, теплофизическими свойствами материала и условиями теплосъема с поверхности. Как уже было отмечено, твэлы, как правило, представляют собой длинные цилиндры с произвольным поперечным сечением. Это позволяет применять теорию для плоской задачи термоупругости при анализе термонапряженного состояния: все поперечные сечения твэла эквивалентны, за исключением тех, которые расположены вблизи концов. Такая идентичность сечений вытекает из принципа Сен-Венана: так как размеры поперечного сечения цилиндрического твэла существенно меньше его длины, данная система находится в состоянии плоской деформации и все сечения деформируются одинаково и только в своей плоскости, т. е. все сечения находятся в одних и тех же условиях. Заметим, что частные случаи решения уравнения теплопроводности для различных тел как с источниками теплоты, так и без них рассмотрены во многих работах. Однако эти решения могут быть получены лишь в том случае, если функция распределения источников тепла допускает интегрирование уравнения. Примером может служить вывод формул для термических напряжений в полой цилиндрической трубке, приведенный в [3]. Недостаток таких решений температурных задач состоит еще и в том, что эти формулы получены из интегральных соотношений, выведенных применительно к телам, не испытывающим внешних нагрузок. В действитель-

ности же в топливном сердечнике напряжения возникают не только вследствие неравномерного нагрева, но и из-за действия внешнего давления газовых осколков деления, вышедших в зазор между топливным сердечником и оболочкой твэла. Поэтому аналитические интегральные формулы решения нельзя принять для проводимого расчета.

В настоящее время наиболее современными методами расчета НДС элементов и конструкций являются компьютерное моделирование и анализ напряженного состояния. Комплексы CAD (средств обеспечения моделирования) и CAE (средств обеспечения исследований) позволяют ускорять процессы проектирования и исследования различных машиностроительных конструкций в целом и конструкций атомного машиностроения в частности. Среди комплексов CAE важное место занимают комплексы метода конечных элементов (МКЭ, FEA), позволяющие проводить имитационное моделирование работы исследуемой конструкции на основе подробного описания ее геометрии, физики моделируемых процессов, свойств применяемых материалов, эксплуатационных характеристик и иных указываемых пользователем исходных и начальных данных. Среди комплексов МКЭ можно указать такие продукты, как ANSYS, COSMOS, MSC/NASTRAN, ABAQUS и др. В частности, комплекс МКЭ ANSYS позволяет проводить исследования не только характеристик динамики и прочности машиностроительных конструкций, но и расчеты полей температур, динамики жидкости и газа, моделирования межканального теплообмена в тепловыделяющей сборке (ТВС) реактора, решение задач нелинейной и усталостной прочности материалов; моделирования последствий чрезвычайных ситуаций; решение задач расчета элементов конструкций АЭС и др.

Рассмотрим достаточно длинный стержневой твэл (рис. 1) с технологическим газовым зазором между топливом и оболочкой. В качестве топлива берется керметная композиция (70 % UO_2 + 30 % Cr). Это топливо является экспериментальным и наиболее перспективным по своим механическим и физическим свойствам в сравнении с керамическим или дисперсным топливом. Следует отметить довольно высокий коэффициент теплопроводности у керметного топлива, что обеспечивает относительно низкий градиент температуры по радиусу сечения керметного топливного сердечника и как следствие – меньшие термические напряжения. Распределение температуры в сердечнике и оболочке считается осесимметричным, плотность делений – равномерной по сечению твэла. Ввиду малости градиентов плотности деления и температуры по высоте твэла отдельные сечения элемента, находящиеся вдали от торцов, можно рассматривать независимо друг от друга в условиях обобщенной плоской деформации ($\epsilon_z = \text{const}$). Распределение температуры в каждом сечении твэла считается стационарным во время всей кампании реактора. Предполагается, что реактор вышел на полную мощность и начальное распределение температуры в сердечнике и оболочке к моменту выхода реактора на заданную мощность задано.

Известно [4, 5], что средства термочностного анализа программы МКЭ ANSYS позволяют использовать результаты решения задачи теплообмена для проведения прочностного анализа. Такая возможность удобна

при определении влияния температурного поля на прочность конструкции: можно задать тепловую нагрузку отдельно или в совокупности с механическими нагрузками.

Решение поставленной термopрочностной задачи определения НДС на базе МКЭ в пакете ANSYS Workbench 11.0 включало в себя следующие этапы:

- построение геометрической модели сечения топливного керметного сердечника;
- разбиение модели сечения на конечные элементы;
- моделирование виртуальной нагрузки и граничных условий (табл. 1);
- расчет и анализ полученных результатов напряженно-деформированного состояния топливного сердечника.

Таблица 1

Исходные данные для расчета напряженного состояния в сечении ТВЭЛ

Величина	Значение
R – радиус топливного сердечника	0,003 м
p – внешнее давление на топливный сердечник	3 МПа
E – модуль упругости топливной композиции	$1,85 \cdot 10^5$ МПа
ν – коэффициент Пуассона топлива	0,29
λ – коэффициент теплопроводности топливной композиции	18 Вт/(м·К)
q_v – тепловыделение в единице объема топливного сердечника	$2,234 \cdot 10^9$ Вт/м ³
α – коэффициент линейного расширения топливного материала	$11,3 \cdot 10^{-6}$ град ⁻¹
T_s – температура внешней поверхности топливного сердечника	600 (873) °С (К)
ϕ – нейтронный поток	$2,81 \cdot 10^{19}$ нейтрон/(см ² ·ч)

Так как каждый слой топливного сердечника находится в одинаковых условиях, где слой как бы зажат между двумя абсолютно жесткими поверхностями и благодаря взаимодействию соседних слоев принудительно обеспечивается условие неизменности толщины слоя (случай плоской деформации), поэтому перемещения вдоль продольной оси модели сечения задаем равными нулю. Также фиксируем перемещения по осям Ox и Oz грани сечения (задача осесимметрична); задаем свойства материала исследуемой модели керметного топливного сердечника (табл. 1). Теперь необходимо связать процессы теплового и прочностного анализов. Выбираем тип решаемой задачи в меню New Analysis: причем сначала выполняя температурный анализ (Steady-State Thermal), получаем температурное поле в модели для заданных граничных условий теплообмена, а затем, опираясь на найденные значения распределения температуры, проводим расчет НДС сечения топливного сердечника (Static Structural), в котором в качестве одного из условий (Thermal Condition) ссылаемся на проведенный Steady-State Thermal анализ. Таким образом, распределения полей температур (результаты постпроцессорной обработки-решения температурной задачи) используются в виде нагрузок на стадиях препроцессорной подготовки и получения решения при последующем анализе НДС. Ниже представлен результат расчета – распределение температуры по сечению. Как видно (рис. 2), максимальная температура в центре сечения керметного топливного сердечника достигает $T = 879,25$ °С, а минимальная (при $r = R$) $T = 600$ °С.

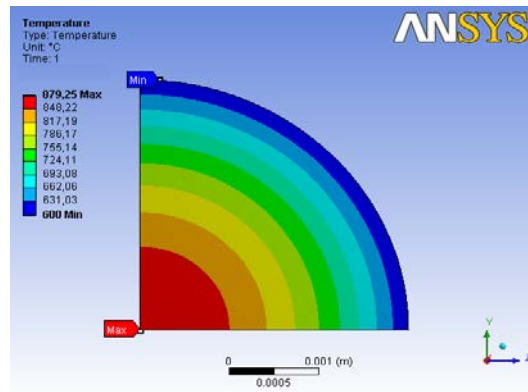


Рис. 2. Распределение полей температур по сечению сердечника

В виртуальной среде конечно-элементного моделирования ANSYS Workbench получены следующие результаты: распределения температуры (Temperature) по сечению топливного сердечника, а также температурных деформаций (Thermal Strain) по сечению модели (рис. 3); совокупные (общие) перемещения точек сечения (Total Deformation) (рис. 4); интенсивность напряжений (Equivalent Stress) в сечении модели (рис. 5) и интенсивность деформаций (Equivalent Elastic Strain) в топливном сердечнике (рис. 6) при данном нагружении (воздействие неравномерного поля температур и внешнего давления со стороны газа в зазоре).

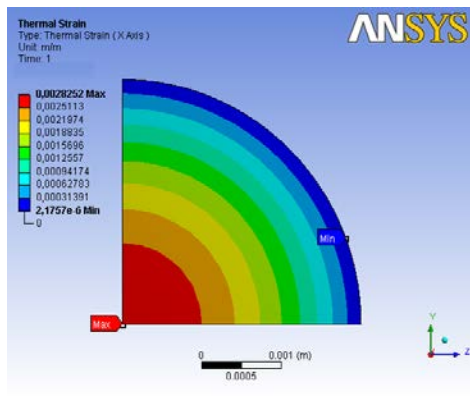


Рис. 3. Распределение температурных деформаций по сечению модели топливного сердечника

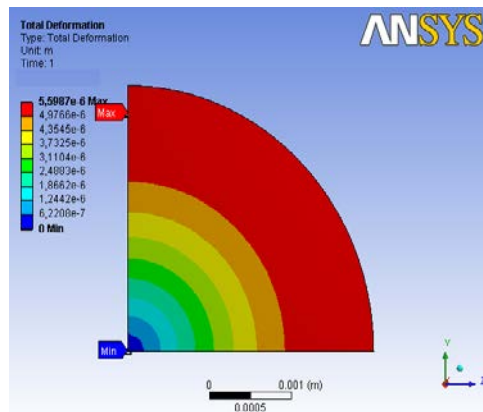


Рис. 4. Перемещения точек сечения модели керметного топливного сердечника

Как видно (рис. 4), максимальные перемещения точек сечения рассматриваемого керметного сердечника равны $5,5 \cdot 10^{-6}$ м, следовательно, при работе твэла контакта рассматриваемого топлива и оболочки не произойдет (толщина газового зазора 10^{-4} м). Также из рис. 3–6 можно оценить уровень внутренних напряжений и деформаций для данного проектируемого керметного сердечника.

Основываясь на результатах экспериментальных и теоретических исследований ИЯЭ АН БССР (ГНУ «ОИЭЯИ – Сосны» НАН Беларуси) [6, 7],

в подобных расчетах на прочность можно использовать эмпирические кривые распределения напряжений и деформации по сечению керметного сердечника.

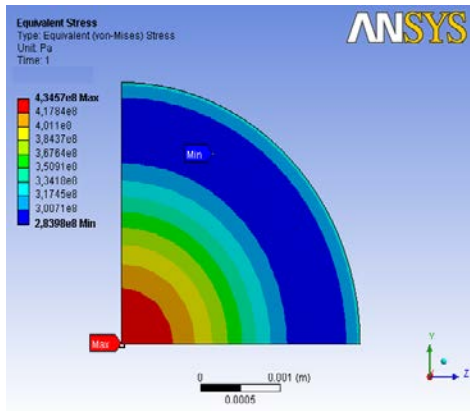


Рис. 5. Интенсивность напряжения в сечении модели топливного сердечника

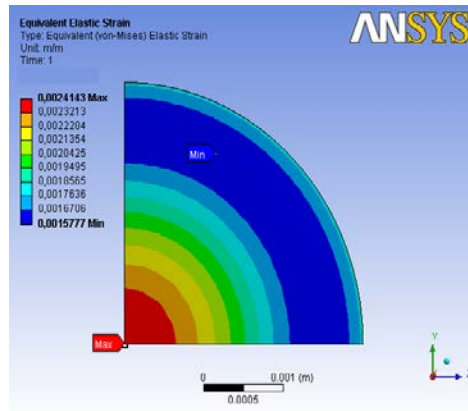


Рис. 6. Интенсивность деформаций в сечении модели топливного сердечника

Зная графическое распределение по сечению сердечника деформаций, методами аппроксимации, можно найти функцию интерполированных числовых значений. Используя расчетную программу нахождения НДС топливного элемента цилиндрической геометрии, получаем характеристики НДС для термоупругой задачи, учитывающей влияние внешнего давления p на сердечник и неравномерного нагрева $T(r)$. При этом предполагаем, что теплофизические и механические характеристики материала остаются неизменными. Абсолютное значение и характер распределения поля температуры определяются мощностью внутреннего тепловыделения, теплофизическими свойствами материала и условиями теплоотвода с поверхности цилиндра. Графические результаты решения аналогичной поставленной термоупругой задачи представлены ниже. Значения всех постоянных указаны в табл. 1.

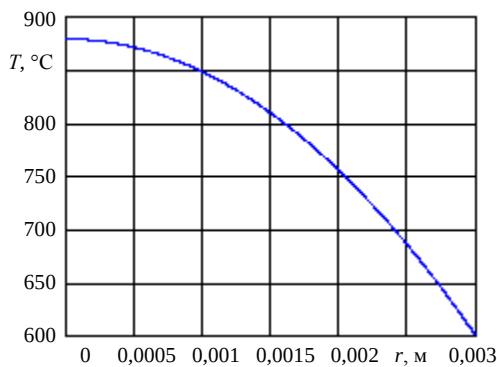


Рис. 7. Распределение температуры по сечению сердечника

Как видно (рис. 7), температура от центра к поверхности спадает по параболическому закону: центральные участки твэла находятся при более высокой температуре по сравнению с поверхностью. То есть приповерхностные области цилиндрического твэла подвержены растягивающим напряжениям, а центральные области – сжимающим. Температурные деформации представлены на рис. 8.

Распределение интенсивности деформаций и напряжений по сечению топливного сердечника представлено на рис. 9, 10.

Как видно, из рис. 5, 10, действующее на сердечник неоднородное температурное поле обуславливает появление значительных термонапряжений, физическая сущность которых связана с неоднородной температурной деформацией (рис. 3, 8) различных участков топливного сердечника: в условиях неоднородного температурного поля горячие участки стремятся расшириться, а соседние холодные участки не допускают этого, поэтому горячие участки

материала находятся в состоянии сжатия, а холодные области находятся в состоянии растяжения. И когда на поверхности твэла со временем выгорания топлива появятся трещины или выемки, макроскопические дефекты сконцентрируют все термонапряжения. Поэтому изучение термонапряженного состояния топливного урансодержащего цилиндрического сердечника при выгорании ядерного топлива имеет большое значение и определяет кинетику изменений напряжений и деформаций в активной зоне реактора.

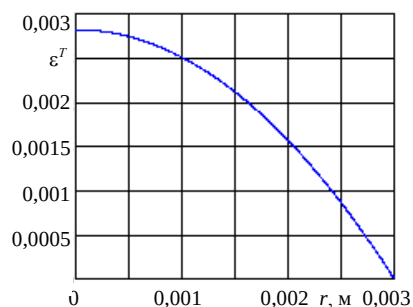


Рис. 8. Распределение температурных деформаций по сечению сердечника

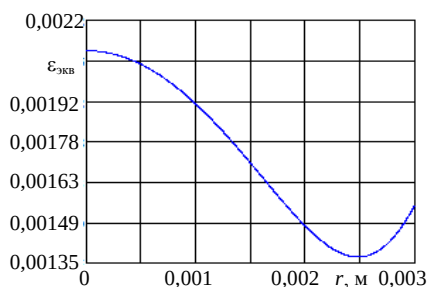


Рис. 9. Интенсивность деформаций по сечению сердечника

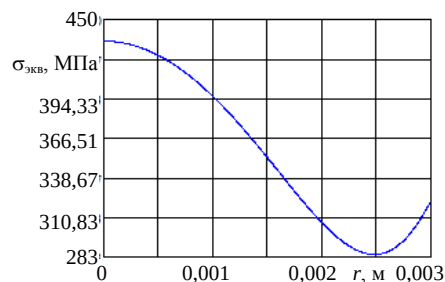


Рис. 10. Интенсивность напряжений в сечении сердечника

Анализируя результаты, полученные на базе теоретико-экспериментального метода и МКЭ в ANSYS Workbench, приходим к полному совпадению результатов распределения температуры (рис. 2, 7), температурных деформаций (рис. 3, 8) и эквивалентных напряжений (рис. 5, 10) по сечению. Незначительное расхождение значений общих перемещений (рис. 4) и эквивалентных деформаций (рис. 6, 9) связано, в первую очередь, с ориентацией их в пространстве и принятой изначально осесимметричностью решаемой численно задачи. Таким образом, полученные в ANSYS Workbench значения основных характеристик НДС достаточно корректны и сопоставимы с расчетными и экспериментальными результатами. Кроме того, распределения напряжений и деформаций, полученные с помощью расчета на базе комплекса ANSYS, позволяют довольно быстро получить наглядное представление о наиболее нагруженных и опасных местах в топливном сердечнике твэла с последующей оценкой прочности по тому или иному критерию.

ВЫВОД

Очевидно, что использование современных методов вычислений, реализованных в комплексах виртуального компьютерного моделирования, дает возможность проводить исследования различных характеристик проектируемых и исследуемых объектов. Это позволяет изменять конструкцию и материал таких объектов без создания экспериментальных образцов и не прибегая к длительной и дорогостоящей процедуре натурных исследований. И хотя окончательное суждение об описанном НДС керметного топливного стержня может быть сделано лишь после соответствующих реакторных испытаний, проектирование подобных элементов активной зоны реактора можно существенным образом облегчить путем использования подобных оценочных расчетов термонапряжений с помощью комплекса МКЭ ANSYS, которые позволяют сразу же в какой-то мере приблизиться к наиболее рациональным конструкциям и решениям в области атомного машиностроения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф р о с т, Б. Твэлы ядерных реакторов / Б. Фрост: пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.
2. Ш и р в е л ь, П. И. О неосесимметричном НДС неравномерно нагретого длинного сплошного цилиндра, подверженного нейтронному облучению / П. И. Ширвель, И. С. Куликов // Машиностроение. – 2008. – Вып. 24, т. 1. – С. 185–191 с.
3. Т и м о ш е н к о, С. П. Теория упругости / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М., 1979. – 551 с.
4. Б а с о в, К. А. Графический интерфейс комплекса ANSYS / К. А. Басов. – М.: ДМК Пресс, 2006. – 248 с.
5. Ч и г а р е в, А. В. ANSYS для инженеров / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.
6. К у л и к о в, И. С. Прочность элементов конструкций при облучении / И. С. Куликов, Нестеренко, Б. Е. Тверковкин. – Минск: Наука и техника, 1990. – 144 с.
7. К у л и к о в, И. С. Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов / И. С. Куликов, Б. Е. Тверковкин. – Минск: Наука и техника, 1994. – 104 с.

Представлена кафедрой
теоретической механики

Поступила 02.12.2009