

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Общие положения обеспечения безопасности атомных станций при проектировании, сооружении и эксплуатации (ОПБ-82).** М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. **Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ-88).** ПНАЭ Г-1-011-89. М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. **Общие положения обеспечения безопасности атомных станций.** НП 306.1.02/1.034-00. Киев, Гос. адм. ядерного регулирования Украины, 2000.
4. **Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций (ПБЯ РУ АС-89).** ПНАЭ Г-1-024-90. М., Госпроматомнадзор СССР, 1990.
5. **Нормы проектирования атомных электрических станций ВНТП 80.** М., Минэнерго СССР, 1981.
6. **Правила устройства и эксплуатации систем аварийного охлаждения и отвода тепла от ядерного реактора к конечному поглотителю.** ПНАЭ Г-5-020-90. М., Госпроматомнадзор СССР, 1991.
7. **Общие положения по устройству и эксплуатации систем аварийного электроснабжения атомных станций.** ПНАЭ Г-9-026-90. М., Госпроматомнадзор СССР, 1991.
8. **Правила проектирования систем аварийного электроснабжения атомных станций.** ПНАЭ Г-9-027-91. М., Госпроматомнадзор СССР, 1992.
9. **Правила технологического проектирования атомных станций (с реакторами ВВЭР).** РД 210.006-90. М., Минатомэнергопром СССР, 1990.
10. **ГОСТ 13109-97.** Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Киев, Госстандарт Украины, 1999.
11. **Требования по ядерной и радиационной безопасности к информационным и управляющим системам, важным для безопасности атомных станций.** НП 306.5.02/3.035-2000. Киев, Гос. адм. ядерного регулирования Украины, 2000.
12. **Правила устройства электроустановок (ПУЭ).** М., Минэнерго СССР, 1986.
13. **Общие принципы безопасности, учитываемые при проектировании атомных электростанций.** Руководство по безопасности 50-SG-D11. Вена: МАГАТЭ, 1988.
14. **Тарасенко В.М., Васильченко В.Н., Мехед А.И. и др.** Устойчивость энергосистемы Украины по частоте и ее влияние на надежность и безопасность работы АЭС. — Ядерная и радиационная безопасность (Киев), 2001, т. 4, вып. 3, с. 85—97.
15. **Тарасенко В.М., Васильченко В.Н., Мехед А.И. и др.** О самозапуске электродвигателей собственных нужд АЭС. — Там же, вып. 4, с. 30—41.
16. **Тарасенко В.М., Васильченко В.Н., Мехед А.И. и др.** Контроль и управление качеством электрической энергии у потребителей собственных нужд АЭС. — Там же, 2002, т. 5, вып. 1, с. 77—85.
17. **Фельдман М.Л., Черновец А.К.** Особенности электрической части атомных электростанций. Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отд., 1983, изд. второе, с. 51—52.

Поступила в Редакцию 18.07.02

УДК 621.039.534

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГРАФИТОВОЙ КЛАДКЕ КАНАЛЬНЫХ РЕАКТОРОВ ПРИ АВАРИЙНОМ РАЗРЫВЕ ТОПЛИВНОГО КАНАЛА

*Соловьев С.Л. (Отраслевой центр Минатома РФ по расчетным кодам),
Габараев Б.А., Новосельский О.Ю., Филинов В.Н. (ФГУП НИКИЭТ
им. Н.А. Доллежале), Парафило Л.М., Крючков Д.В.
(ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейтунского)*

Обоснование безопасности эксплуатации реакторов канального типа требует доказательства невозможности вторичного разрыва топливных каналов, инициированного первичным разрывом одного аварийного канала. Наиболее вероятной причиной первичного разрыва является перегрев канала при дисбалансе между его

мощностью и расходом теплоносителя. Данные обследования графитовой кладки после аварий с разрывом топливного канала на Ленинградской и Чернобыльской АЭС свидетельствуют о воздействии поперечных усилий на каналы, находившиеся в непосредственной близости от аварийного. Хотя при этом не произошло разрушения соседних каналов, возможность вторичного инициированного разрыва при реализации наихудшего сценария аварии остается открытой.

Определение сценария, приводящего к наиболее опасному напряженно-деформированному состоянию соседних с аварийным каналам труб, возможно только путем расчетного анализа с помощью компьютерного кода, который адекватно описывает поведение всей графитовой кладки с топливными каналами под действием силовых факторов, вызванных разрывом аварийного канала, и учитывает изменение геометрии объекта в ходе аварии. Первым вариантом такого кода являлся расчетный код R_SPACE, с помощью которого впервые была проведена оценка возможности разрыва труб неаварийных топливных каналов под действием внутренних и внешних усилий, созданных разрывом соседнего канала при его перегреве [1]. С помощью кода была выполнена расчетная оценка деформации кладки и возникающих дополнительных поперечных усилий на окружающие канальные трубы.

В процессе работы с кодом R_SPACE выявились его некоторые недостатки, в первую очередь в моделировании графитовой кладки реактора. Новый код U_STACK [2], замещающий R_SPACE, позволяет проводить более корректный расчетный анализ процессов в графитовой кладке при разрыве топливного канала. Код разработан по инициативе Отраслевого центра Минатома России по расчетным кодам специалистами НИКИЭТа и ФЭИ с привлечением для анализа напряженно-деформированного состояния канальных труб экспертов ВНИИЭФ.

Основными узлами конструкции РБМК являются кладка, представляющая собой массив собранных из графитовых блоков вертикальных колонн, топливные каналы, каналы системы управления и защиты (СУЗ) и охлаждения отражателя, проходящие через отверстия в графитовых блоках, внешние металлические конструкции и биологическая защита.

Кладка РБМК состоит из 2488 графитовых колонн (34 832 графитовых блока), через которые проходят 2044 трубы различного типа. Графитовые блоки представляют собой параллелепипеды поперечным сечением 250×250 мм разной высоты с центральным отверстием. Кладка в течение проектного срока эксплуатации подвергается радиационному и термохимическому воздействию, в результате которого в ней происходят существенные изменения размеров и формы блоков, теплофизических и механических свойств графита.

Активная зона размещена в герметичном реакторном пространстве, образованном цилиндрической обечайкой и двумя горизонтальными плитами — верхней и нижней. Обечайка выполнена в виде цилиндра диаметром 14,5, высотой 9,75 м. Реакторное пространство заполнено гелиево-азотной смесью при давлении, близком к атмосферному.

При разрыве топливного канала происходит истечение кипящего теплоносителя высоких параметров в графитовую кладку, сопровождающееся дальнейшей генерацией пара из-за падения давления в потоке и теплообмена с горячими поверхностями конструкций реактора. Динамика давления в реакторном пространстве в

этом случае в существенной мере определяется соотношением между указанными источниками пара и его стоками. Стоки — это прежде всего отвод пара через трубопроводы системы защиты реакторного пространства. Кроме того, возможен отвод пара в дренажную систему и его конденсация на холодных поверхностях труб каналов СУЗ. В случае больших течей давление в разных областях объема кладки оказывается существенно различным, что приводит к сложной картине деформирования, характеризующейся перемещением элементов конструкции активной зоны и увеличением зазоров в одних областях кладки с одновременным их уменьшением в других областях.

Расчетный код U_STACK разработан для детального трехмерного численного моделирования процессов течения и теплообмена двухфазного потока, а также перемещения и деформирования конструкций активной зоны водографитовых реакторов при авариях с разрывом топливного канала. Задача расчета течения двухфазного потока в условиях теплообмена между теплоносителем, графитом и металлоконструкциями решается для системы щелей с изменяющимися размерами, оцениваемыми путем одновременного расчета движения графитовых блоков, нагруженных силами давления и реакциями взаимодействия между собой, с канальными трубами и окружающими металлоконструкциями. В свою очередь, последняя задача связана с расчетом деформации канальных труб и металлоконструкций при переменных условиях нагружения.

Код U_STACK позволяет моделировать следующие связанные во времени и пространстве процессы:

- течение и теплообмен неравновесного многокомпонентного двухфазного потока в циркуляционном контуре, графитовой кладке и за ее пределами до и после разрыва топливного канала;

- деформирование и разрыв трубы аварийного канала с соответствующим разрушением графитовых блоков в условиях аварийного нагрева;

- перемещение и деформирование элементов графитовой кладки под действием усилий, вызванных разрывом канала;

- функционирование системы защиты реакторного пространства и системы локализации аварий.

Расчет усилий и перемещений в графитовой кладке включает в себя оценку целостности труб неаварийных каналов под действием внутреннего давления и дополнительных силовых факторов, формирующихся в процессе развития аварии.

Методически код представляет собой объединение механического и теплогидравлического расчета блоков. Теплогидравлические и механические процессы в кладке рассматриваются в неразрывной связи с процессами, протекающими в контуре циркуляции и трубопроводах системы защиты реакторного пространства, системы локализации аварий и дренажной системы. Механический расчетный блок моделирует высокотемпературное деформирование и разрыв трубы аварийного канала, перемещения и повороты графитовых блоков под действием усилий, вызванных разрывом, силовое воздействие на трубы каналов и их прогибы. Механический расчетный блок основан на:

- экспериментальных данных и соотношениях, описывающих поведение канальных труб и графитовых блоков;

уравнениях движения твердых тел с тремя поступательными и двумя вращательными степенями свободы для описания движения графитовых блоков;
уравнении упругой балки для описания прогиба труб.

Основу теплогидравлического расчетного блока составляет код улучшенной оценки RELAP5/mod3.2, в который внесены дополнения, учитывающие особенности процессов в условиях изменяющейся геометрии гидродинамических объектов. Теплогидравлический блок моделирует процессы течения и теплообмена теплоносителя по тракту аварийного канала до места разрыва и далее от места разрыва через пространство кладки до системы локализации аварий. При этом в данном блоке используются два подхода:

код RELAP5/mod3.2, базирующийся на детальной нодализации относительно небольшой области кладки, примыкающей к зоне разрыва, где возникают наибольшие изменения геометрии и параметров протекающей среды, и на использовании укрупненных участков реакторного пространства для моделирования удаленных областей;

дополнительная гомогенная модель, которая с помощью специальных интерполяционных процедур определяет распределение давления в областях крупных блоков реакторного пространства вне области аварийного канала.

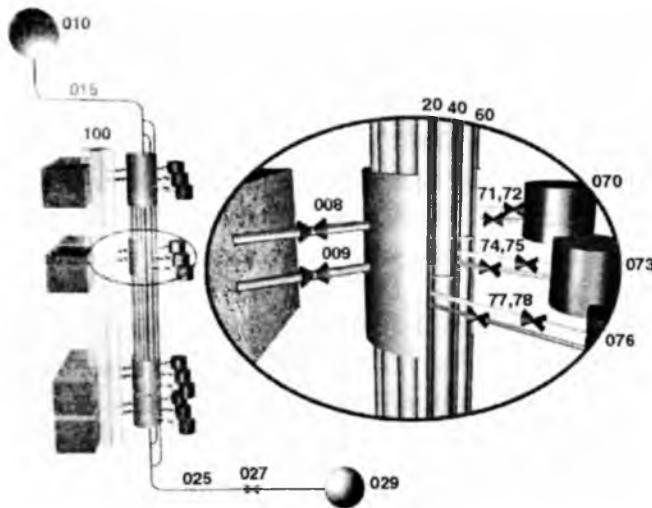
Кроме того, в расчетной модели учитываются разрушение графитовых блоков аварийной колонны и предварительная деформация кладки до разрыва топливного канала, конечная скорость разрыва канальной трубы, перемещение обломков графитовых блоков в зазорах между графитовыми колоннами.

Аварийный процесс анализируется по заданному сценарию, определяющему начальные и граничные условия задачи. В качестве аварий, приводящих к разгерметизации, могут быть рассмотрены как перегрев топливных каналов, так и спонтанный разрыв из-за дефекта канальной трубы в нормальных условиях эксплуатации. Для начальной фазы аварийного процесса рассчитываются параметры теплоносителя в контуре циркуляции, температура оболочек твэлов и труб топливных каналов. Параллельно решается пространственная задача вязкопластического деформирования трубы аварийного канала, нагруженной внутренним давлением, при переменном по высоте и во времени поле температуры. При этом учитывается взаимодействие раздувающейся канальной трубы с элементами графитовой колонны, рассчитывается разрушение графитовых блоков и изгиб соседних колонн до момента разгерметизации аварийного канала. На каждом временном шаге определяются параметры напряженно-деформированного состояния трубы аварийного канала. С помощью высокотемпературных критериев разрушения канальных труб РБМК [3] определяются момент разрыва, температура и деформация трубы при разрыве, а также число и координаты разрушенных графитовых блоков. В процессе развития разрыва и после его завершения рассчитывается истечение теплоносителя в кладку с учетом внутренних процессов для всего тракта аварийного канала, включая подводящие и отводящие коммуникации.

Реальные теплогидравлические процессы в кладке в значительной мере зависят от параметров истекающего теплоносителя и являются существенно нестационарными и неравновесными — двухфазный поток с температурой жидкой фазы $\sim 100^\circ\text{C}$ протекает вдоль поверхностей графитовых блоков, имеющих температуру около 600°C , возможны сепарационные эффекты с отводом жидкости в дренаж и

восходящим потоком пара. Кроме того, изначально в объеме кладки содержится около 400 м^3 газа, который замещается истекающей пароводяной смесью в течение длительного времени, что сказывается на протекании физических процессов.

В отношении контура циркуляции при моделировании аварийных процессов в кладке оказалось возможным ограничиться рассмотрением тракта канала от раздаточного группового коллектора до барабана-сепаратора (рис. 1). При этом схема содержит:



Р и с. 1. Модель тракта аварийного топливного канала

Р и с. 1. Модель тракта аварийного топливного канала

условные объекты (070, 073, 076), предназначенные для моделирования выхода водорода в каналах при протекании пароциркониевой реакции. Объемы этих объектов гидравлически связаны с объемами трактов топливных сборок с помощью соответствующих пар множественных соединений (71, 72), (74, 75), (77, 78).

С каждой из кольцевых труб 20, 40, 60 связана пара тепловых структур, одна из которых соответствует твэлам, другая используется для моделирования энергетического вклада пароциркониевой реакции, определяемой температурой поверхности и парциальным давлением водяного пара. Кроме того, с трубой 60 связана тепловая структура, моделирующая процессы в графитовых блоках.

Поскольку перечень аварийных сценариев предполагает широкий диапазон разброса параметров разрыва трубы, в качестве исходных данных для расчета задаются координаты места разрыва в активной зоне, размер отверстия разрыва и направление течи теплоносителя. При этом временные зависимости расхода и энтальпии теплоносителя, истекающего через разрыв, определяются регулярными расчетными процедурами кода.

Моделируемыми компонентами исследуемой системы являются (рис. 2): часть тракта аварийного топливного канала;

область кладки, моделирующая окрестность аварийного канала (группа колонн до 69 шт. в случае одиночного разрыва);

входной участок тракта канала (025) с запорно-регулирующим клапаном (027), подключенный к раздаточному групповому коллектору (029);

тракты топливных сборок (20, 40, 60), соответствующие кольцевому расположению твэлов ТВС;

пароводяные коммуникации (015), подключенные к барабану-сепаратору (010);

гидравлические связи верхней (008) и нижней половин (009) отверстия разгерметизации

остальная часть кладки, разбитая на восемь областей, связанных с внешними участками аварийной области кладки;

верхний и нижний газовые объемы реакторного пространства, связанные с аварийной областью кладки, восемью остальными областями кладки, восемью трубами системы защиты реакторного пространства, дренажной системой;

системы защиты реакторного пространства и локализации аварий;

дренажная система.

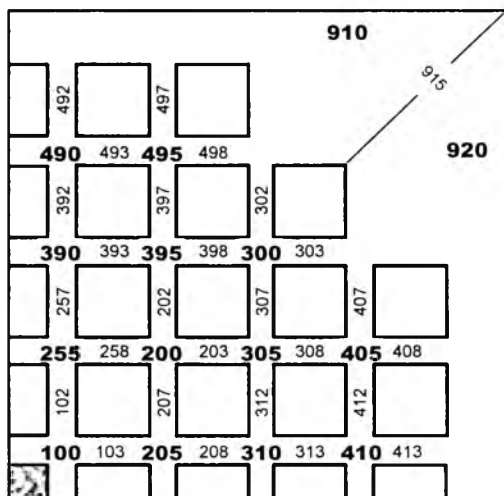
Вследствие симметрии расчетной схемы графитовой кладки на рис. 2 показана 1/4 часть.

Аварийная группа колонн представляет собой фиксированный объект, который может быть размещен в любой части плана реактора. Секторные трубы 910—980, каждая из которых содержит переменное число зазоров данной части кладки и их связи с аварийным объектом, формируются путем разбиения активной зоны в плане на секторы с учетом положения аварийной группы.

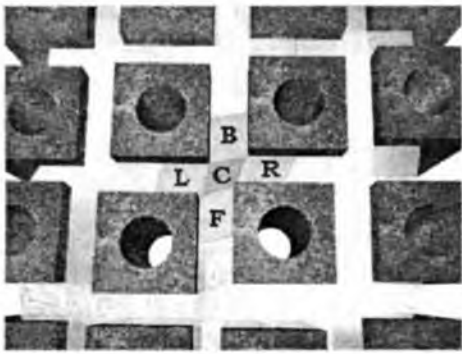
Существенными процессами для кладки являются теплообмен двухфазного потока с графитовыми блоками и графитовых блоков с топливными каналами и каналами СУЗ. Эти процессы моделируются с помощью тепловых структур. Каждая колонна графитовых блоков разбивается на четыре тепловые структуры с правым и левым граничным гидравлическим объектом. Геометрия тепловых структур — цилиндрическая, левая граница — внутренняя поверхность трубы канала, правая соответствует внешней боковой поверхности графитовых блоков.

Ввиду того, что используются одномерные тепловые структуры, на каждом шаге по времени вычислительного процесса к каждому графитовому блоку, для которого оценивается температура, применяется дополнительная процедура учета теплопроводности в азимутальном направлении для коррекции распределения температуры по сечению блока.

Основными определяющими параметрами структурно-механической задачи для графитовой кладки являются геометрические параметры. Каждый блок характеризуется индивидуальными габаритными размерами, размером центрального отверстия, X_c, Y_c, Z_c — координатами центра; φ_1, φ_2 — углами поворотов блока вокруг осей X и Y . Углы азимутального поворота φ_2 блоков относительно оси Z остаются неизменными при любом течении рассматриваемых процессов: $\varphi_2 = 0$. Графитовые блоки рассматриваются как прямоугольные параллелепипеды, размеры которых изменяются в результате радиационного формоизменения. Гидравлическая система зазоров между блоками моделируется вертикальными каналами крестовидного поперечного сечения и горизонтальными гидравлическими связями между каждой парой соседних каналов (рис. 3). Каждый крестовидный канал образован четырьмя половинами зазоров (L — левый, B — задний, R — правый, F — передний) между



Р и с. 2. Нодализационная схема кладки РБМК: центральная часть — область разрыва; 910—980 — крупноблочные области



Р и с. 3. Модель гидравлической системы зазоров

соседними блоками и центральной частью (С — центр). Размер зазоров определяется положением центров и углом поворотов соответствующих пар графитовых блоков.

Движение каждого графитового блока в условиях возможного взаимодействия с 16 соседними графитовыми блоками складывается из поступательных перемещений в направлении горизонтальных осей X и Y и поворотов в плоскостях XZ и YZ . Горизонтальные направления X и Y принимаются равноправными. Движение блоков в вертикальном направлении Z принимается виртуальным, т.е. оценивается возможность

такого движения, учитывается влияние соответствующих перемещений на некоторые геометрические параметры и силовое воздействие на верхнюю плиту реактора.

Поступательные перемещения блоков определяются инерцией блоков, давлением среды на боковых гранях блоков, контактными усилиями со стороны соседних блоков, реакцией трубы, проходящей через осевое отверстие блоков, и сопротивлением трения при относительном перемещении соседних блоков. При расчете поворотов учитываются моменты инерции и моменты вращения, создаваемые давлением на гранях блоков, контактными усилиями и силами трения.

Уравнение поступательного движения графитового блока вдоль одного из равноправных горизонтальных направлений — оси X — записывается следующим образом:

$$m \frac{\partial^2 \Delta x}{\partial \tau^2} = \sum_i F_i,$$

где m — масса блока; Δx — перемещение в направлении X ; τ — время; F_i — i -й компонент усилия, действующего в направлении X , который определяется равнодействующей сил давления, действующих на противоположных гранях блоков, результирующей сил контактного взаимодействия с соседними блоками, результирующей сил трения при взаимном перемещении блоков, реакцией трубы.

Уравнение вертикального перемещения графитового блока в направлении оси Z определяется уравнением

$$m \frac{\partial^2 \Delta z}{\partial \tau^2} = F_{\text{res}},$$

где Δz — перемещение; F_{res} — результирующая сил, действующих на рассматриваемый блок: гравитационной силы, равнодействующей сил давления, равнодействующей сил контактных взаимодействий, равнодействующей сил трения.

Для решения системы уравнений перемещений блоков используется метод пространственного расщепления [4]. Расщепление выполнено по направлениям главных осей X , Y , Z (пять направлений, рис. 4) и диагональным направлениям (восемь направлений, рис. 5), что определяется полным набором блоков, которые могут взаимодействовать с текущим рассматриваемым блоком.

Рассматриваются повороты графитовых блоков относительно осей X и Y , проходящих через геометрический центр. Повороты вокруг оси Z не рассматриваются. Блоки принимаются идеально симметричными относительно каждой из плоскостей, проходящих через центр.

Уравнение вращательного движения блока вокруг одной из равноправных осей X выглядит следующим образом:

$$J_X \frac{\partial^2 \Delta \varphi}{\partial \tau^2} = \sum_i M_i,$$

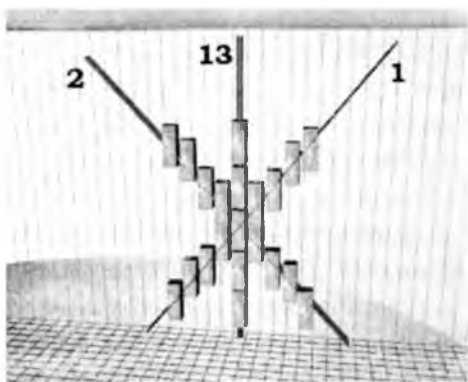
где J_X — момент инерции блока относительно оси X ; $\Delta \varphi$ — угол поворота блока; M_i — момент i -го компонента силы, определяемый вращающим моментом, создаваемым давлением среды на гранях блока, моментами нормальных сил контактного взаимодействия с соседними блоками, сил трения, возникающих при относительном движении блоков и реакции трубы.

Оценка поворотов идентична оценке перемещений графитовых блоков. Вместе с тем эта задача существенно менее трудоемкая, так как рассматриваются только две степени свободы (вращение вокруг оси X и вокруг оси Y).

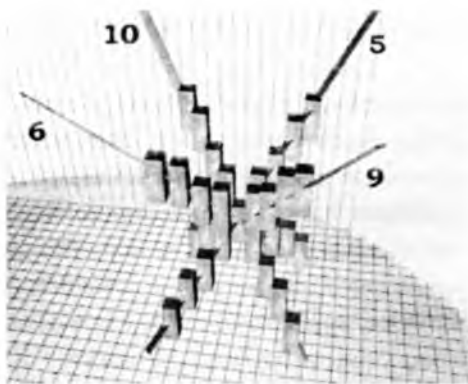
Каждая канальная труба рассматривается как статически нагруженная упругая балка с жесткой заделкой в верхнем сечении и скользящей опорой в нижнем сечении. Прогиб трубы реализуется в плоскостях ZX и ZY под воздействием локальных контактных усилий, вызванных взаимодействием трубы и перемещающихся блоков. При этом упругая линия оси трубы описывается двумя сплайнами: $X_{i,j}^+(z)$, $Y_{i,j}^+(z)$.

Оценка возможности вторичного разрыва базируется на расчете нестационарного напряженно-деформированного состояния канальных труб, находящихся в непосредственной близости от разрушенного канала. Это состояние определяется внутренним давлением теплоносителя, изгибом труб из-за деформации графитовой кладки, локальными контактными силами от взаимодействия труб с графитом.

При расчете с помощью кода U_STACK определяются прогиб графитовых колонн с трубами топливных каналов и усилия, приложенные к отдельным блокам каждой графитовой колонны в нескольких сечениях по высоте трубы там, где такой контакт оказывается возможным. Результирующие усилия в виде контактных сил передаются на канальные трубы. Каждый из факторов нагружения вносит свой вклад в напряженное состояние труб топливных каналов.



Р и с. 4. Направления пространственного расщепления уравнения движения блоков в плоскости XZ вдоль главной оси X



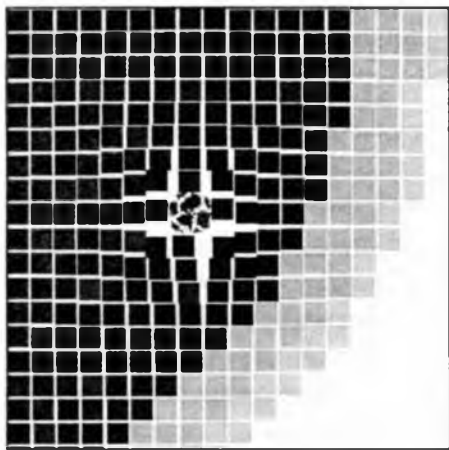
Р и с. 5. Диагональные направления пространственного расщепления для уравнения движения блоков вдоль осей X и Y

Прочность канальных труб оценивается по переходу материала труб из упругого в пластическое состояние путем сравнения интенсивности напряжений с пределом текучести и разрушению труб, оцениваемому по максимальным относительным деформациям. Оценка прочности неаварийных канальных труб позволяет определить условия их индуцированного разрыва и, таким образом, возможность множественного разрыва топливных каналов.

Код состоит из многофункциональной графической оболочки, препроцессора и основного исполняемого расчетного модуля. Графическая оболочка позволяет формировать исследуемый объект на базе системы прототипов, задавать определяющие параметры сценария аварии, создавать графическое представление результатов расчета, формировать выходные информационные потоки. Задача препроцессора — оценка диаметра труб и габаритов графитовых блоков на основании данных о составе и параметрах активной зоны и локальных значениях флюенса. Другая важная функция препроцессора — обеспечение высокой вычислительной эффективности используемых алгоритмов путем предварительного формирования массивов данных о коэффициентах уравнений по всем пространственным направлениям интегрирования. Исполняемый расчетный модуль состоит из теплогидравлического и механического блоков и решает связанную задачу теплогидравлики и структурной механики кладки с переменными шагами по времени с использованием процедуры синхронизации решения проблем.

В качестве примера использования кода U_STACK приведем результаты расчета аварийной ситуации с одиночным разрывом топливного канала мощностью ~2 МВт, расположенного близко к периферии активной зоны. Разрыв зафиксирован в верхней части канала, как это имело место на третьем энергоблоке Ленинградской АЭС в 1992 г.

Согласно результатам расчета к 10-й секунде от момента разрыва суммарный расход стабилизируется на уровне 26 кг/с. В результате выброса большого количества теплоносителя в графитовую кладку повышается давление во всем объеме реакторного пространства. Перепады давления среды на графитовых блоках приводят к их смещению. На рис. 6 показана картина деформации графитовой кладки через несколько десятков секунд после разрыва канала. Отчетливо видны кресто-



Р и с. 6. Деформация графитовой кладки в области разрыва топливного канала

видные полости, сформировавшиеся под действием перепадов давления в поперечном сечении кладки. В процессе развития аварии на трубы соседних каналов действуют локальные усилия в местах контакта с графитовыми кольцами. Пространственное положение точек приложения усилий изменяется в ходе процесса. Изгиб соседних каналов локализован преимущественно в верхней части, там же формируется наиболее опасное напряженное состояние канальных труб.

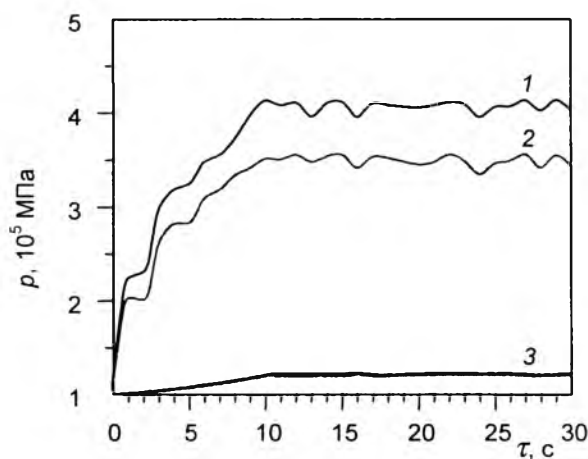
На рис. 7 показана динамика давления в зоне разрыва аварийного канала в нескольких сечениях по высоте кладки. Максимальное давление развивается в зазоре между

аварийной и неаварийной колоннами на уровне разрыва трубы. В сечении разрыва давление достигает своего максимума 0,42 МПа примерно к 11-й секунде. В дальнейшем процесс глобального деформирования кладки останавливается и отмечается только незначительное периодическое смещение отдельных графитовых блоков относительно достигнутого положения равновесия, вызываемое колебаниями давления. Гидродинамические условия для отвода парогазовой смеси из зоны разрыва становятся приблизительно стационарными, давление в зоне разрыва стабилизируется на максимальном достигнутом уровне. Аналогичная стабилизация давления происходит и в остальных областях кладки. Уровень давления ниже зоны разрыва оказывается существенно ниже максимального значения, что объясняется верхним расположением разрыва канала и преимущественным истечением парогазовой смеси из зоны разрыва вверх в полость реакторного пространства над графитовой кладкой.

Анализ распределения поля давления по объему графитовой кладки показывает, что область большого давления среды локализована в малом объеме кладки. Давление за пределами зоны разрыва не превышает 0,13 МПа, что позволяет говорить об отсутствии каких-либо значительных усилий на большие фрагменты графитовой кладки и окружающие металлоконструкции при одиночном разрыве топливного канала.

Таким образом, расчетный код нового поколения U_STACK обеспечивает возможность детального трехмерного моделирования теплогидравлических и механических процессов, которые могут протекать в кладке водографитовых реакторов при авариях с разрывом топливного канала.

Основополагающим принципом методологии кода U_STACK является системный подход, предполагающий возможно полный учет разнородных физических процессов и основных конструктивных особенностей кладки. При этом аварийный сценарий задается исходным событием, последующее развитие обеспечивается моделированием тракта канала, деформирующейся трубы, разрушающихся графитовых блоков и всей кладки в целом. Применение кода нового поколения позволит существенно повысить доказательность анализов безопасности РБМК.



Р и с. 7. Давление в зоне разрыва аварийного топливного канала: 1 — сечение разрыва, 2 — верх колонны; 3 — середина — низ колонны

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Габараев Б.А., Новосельский О.Ю., Филинов В.Н., Парафило Л.М. Оценка целостности топливных каналов РБМК под действием нагрузок от разрыва одного из них. — Атомная энергия. 2000, т. 89, вып. 2, с. 91—96.

2. Габараев Б.А., Крючков Д.В., Новосельский О.Ю. и др. Развитие программных средств для комплексного анализа механики структур, теплогидравлических и термохимических процессов в кладке водографитовых реакторов: Препринт ГУП НИКИЭТ ЕТ-00/52, 2000.
3. Новосельский О.Ю., Филинов В.Н. Критерии разрушения труб топливных каналов РБМК при аварийном нагреве. — Атомная энергия, 1997, т. 82, вып. 4, с. 277—282.
4. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. М.: Наука, 1971.

Поступила в Редакцию 1.11.02

УДК 543.257.1

ВОЗМОЖНОСТЬ УТИЛИЗАЦИИ ОТРАБОТАВШИХ ГРАФИТОВЫХ ВТУЛОК РЕАКТОРОВ СИБИРСКОГО ХИМИЧЕСКОГО КОМБИНАТА ПУТЕМ СЖИГАНИЯ

*Бушуев А.В., Алеева Т.Б., Петрова Е.В., Зубарев В.Н. (МИФИ),
Николаев А.Г. (Сибирский химический комбинат), Семенов В.Г.
(ГНЦ РФ — Институт биофизики), Силин Б.Г. (Минатом РФ),
Дмитриев А.М. (ГАН РФ)*

Стратегической задачей при обращении с радиоактивными отходами независимо от их происхождения и характеристик является исключение загрязнения окружающей среды радионуклидами и другими токсичными веществами, входящими в состав отходов, на весь период их потенциальной опасности. Это соответствует принятому на международном уровне принципу, согласно которому нерешенные проблемы экологии не должны оставаться в наследство последующим поколениям.

В процессе продолжительной эксплуатации реакторов разных типов накоплено значительное количество отработавшего графита, использовавшегося в качестве замедлителя и отражателя нейтронов. Например, в Великобритании построено 26 магноксовых реакторов (в самом большом из них содержалось более 3000 т графита) и 14 коммерческих реакторов типа АGR (около 2000 т в каждом), во Франции работали три АЭС с магноксовыми реакторами, в Ханфорде (США) — девять выведенных из эксплуатации реакторов-производителей оружейного плутония. Графитовые реакторы были построены в Испании, Японии и Италии (магноксовые), Германии и Китае, в Советском Союзе — 13 графитовых реакторов-производителей оружейного плутония, четыре графитовых реактора на АЭС в Билибино, два — на Белоярской АЭС и 18 РБМК [1]. Реакторный графит составляет большую часть накопленных в мире твердых радиоактивных отходов, и поиск способов его утилизации является актуальной задачей.

Цель настоящей работы — оценка радиоактивного загрязнения отработавших графитовых втулок остановленных реакторов И-1, ЭИ-2 и АДЭ-3 Сибирского химического комбината и анализ возможности их утилизации путем сжигания. При планировании мер по обращению с отработавшим графитом необходимо учитывать тип реактора, характеристики графита, особенности его эксплуатации и хранения.

Загрязнение отработавшего графита российских реакторов-производителей оружейного плутония имеет особенности, обусловленные следующими причинами: