

Т а б л и ц а 2. Результаты выборочного прокола твэлов

Характеристика	Номер твэла	
	224	104
Свободный объем, см ³	28,08	27,73
Давление, МПа	2,396	2,400
Состав газа, %:		
He	97,81	97,88
N ₂	0,11	0,09
O ₂	0,02	0,02
Kr	0,22	0,22
Xe	1,84	1,78

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способ определения разрушенных твэлов. Патент ФРГ № 3210302, кл. G01L 11/00, 1982.
2. Способ обнаружения топливных стержней с дефектами. Патент ФРГ № 2642156, кл. G21C 17/06, 1976.
3. Неразрушающий акустический метод измерения давления газа в твэлах. Патент США № 4009616, кл. G01L 9/00, G01N 29/02, 1977.
4. Способ неразрушающего измерения давления газообразных продуктов деления в твэлах ядерных реакторов. Патент ФРГ № 3326737, кл. G21C 17/06, 1983.
5. Устройство для определения разрушенного твэла. Патент Японии № 63-9894(A), кл. G21C 17/06, 1986.
6. Snyder B. Experience with the Brown Boveri failed fuel rod detection system (FFRDS). — In: Underwater Inspection, Repair and Reconstitution of Water Reactor Fuel. Vienna: IAEA, 1988, p. 40—47.
7. Markgraf J. e.a. Non-destructive determination of fission gas release in ramp-tested LWR fuel rods. — In: Post Irradiation Examination and Experience. Vienna: IAEA, 1985, p. 241—254.
8. Устройство для измерения скорости потока жидкости в трубе. Патент Великобритании № 1035324, кл. G08C, 1962.
9. Устройство для неразрушающего испытания объектов на наличие в них дефектов или трещин. Патент США № 3222917, кл. G01N 25/00, 1962.

Поступила в Редакцию 4.07.95

УДК 539.37+661.666

ДЕФОРМАЦИЯ ГРАФИТОВОЙ КЛАДКИ РЕАКТОРОВ ЭГП-6
БИЛИБИНСКОЙ АЭС ПОД ДЕЙСТВИЕМ ОБЛУЧЕНИЯ

Акимов И.С., Куршанов А.В. (Билибинская АЭС)

На Билибинской АЭС работают четыре энергоблока с реакторами ЭГП-6. Блоки с интервалом 1 год вводились в эксплуатацию с января 1974 г.

Кладка реакторов Билибинской АЭС собрана из графитовых блоков квадратного сечения 198,6×198,6 мм, размещенных в квадратной решетке с шагом 200×200 мм. В каждом из них есть цилиндрическое отверстие диаметром 88,6^{+0,1} мм, ось которого смещена относительно вертикальной оси на 10 мм в направлении одной из граней. Высота графитовых блоков может составлять 150, 300 или 450 мм. Однако высота графитового блока, находящегося в активной зоне реактора, составляет без учета кольцевого торцевого выступа 450 мм (высота активной зоны 3 м). Поперечным смещениям блоков одного столба кладки относительно другого препятствуют торцевые кольцевые выступы в верхней части каждого блока, входящие в соответствующие уступы в его нижней части. Схематический чертеж блока показан на рис. 1.

В отверстие каждого столба кладки активной зоны реактора помещаются либо ТВС, либо каналы СУЗ. В активной зоне ТВС и каналы СУЗ состоят из цилиндрических

графитовых втулок диаметром $88-0,1$ мм и $79,9-0,1$ мм соответственно, внутри которых размещены либо шесть трубчатых твэлов и опускаемая центральная стальная трубка (для ТВС), либо трубки с охлаждающей водой (для канала СУЗ) [1]. Всего в реакторе находится 273 ТВС и 60 каналов СУЗ.

Зазор между графитовыми втулками и графитовыми блоками кладки выбран в проекте исходя из двух требований: он должен быть достаточно малым, чтобы обеспечить отвод тепла из графитовой кладки, и достаточно большим, чтобы избежать защемления ТВС графитовыми блоками в процессе усадки графита под действием нейтронного облучения.

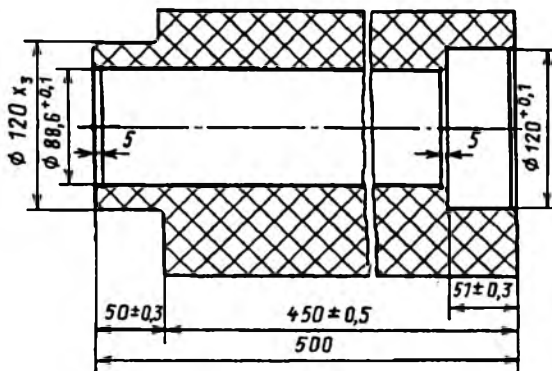
Систематические измерения геометрических размеров отверстий в ячейках графитовой кладки на АЭС начаты в 1987 г., когда реактор первого энергоблока уже проработал 13 лет. Измерения проводили с помощью устройства, в котором расположены два взаимно перпендикулярных дифференциально-трансформаторных датчика, преобразующих их линейные перемещения в электрический сигнал, подаваемый на двухканальный самопишущий прибор.

Реакторы АЭС работают в режиме частичных перегрузок топлива, проводимых на остановленном реакторе, когда вместо отработавших ТВС загружаются свежие. При этом перестановки ТВС в активной зоне реактора проектом не предусмотрены и не проводятся. Именно после выгрузки отработавших ТВС и измеряли диаметр отверстий в ячейках графитовой кладки. Во время каждой перегрузки топлива проводили замеры для двух-трех ячеек реактора. Казалось естественным выбирать для измерения диаметра ячейки, подвергшиеся за время эксплуатации реактора наибольшему облучению быстрыми нейтронами, для измерения кривизны столба кладки — ячейки с наиболее неравномерным облучением. Это были соответственно ячейки центральной части активной зоны, окруженные ячейками с ТВС, и ячейки, расположенные на границе с отражателем.

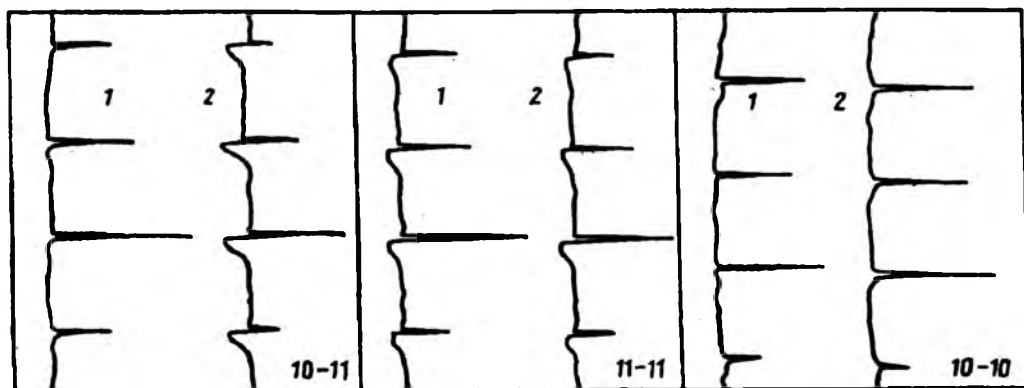
В первых же измерениях было замечено, что на фоне общего уменьшения диаметра отверстия в графитовых блоках наблюдается дополнительное снижение диаметра в местах расположения кольцевых выступов блоков. В дальнейшем по мере накопления результатов замеров и их анализа выявилось существенное влияние на характер уменьшения диаметра отверстия и деформацию кольцевого выступа ближайшего окружения рассматриваемой ячейки. Существенным оказалось, окружена ли она только ячейками с ТВС или в соседних ячейках расположены каналы СУЗ, блоки отражателя и т.п. О взаимном расположении ТВС и каналов СУЗ можно судить по приводимой в работе [1] картограмме ЭГП-6.

На рис. 2 приведены результаты измерения в двух взаимно перпендикулярных направлениях диаметра отверстий для ячеек 11—11 и 10—11, первая из которых всеми четырьмя гранями примыкает к ячейкам с ТВС, вторая — двумя гранями к ячейкам с каналами СУЗ и двумя другими к ячейкам с ТВС. На том же рисунке приводятся результаты измерения для ячейки 10—10, выполненные в декабре 1994 г. во время замены каналов СУЗ в реакторе первого энергоблока.

Из анализа рис. 2 следует, что наибольшей деформации, приводящей к уменьшению диаметра отверстия, подвержены торцевые кольцевые выступы графитовых блоков, причем максимальная деформация торцевых выступов реализуется в направлении «на каналы СУЗ», а в направлении, ему перпендикулярном, деформация этих выступов имеет противоположный знак (т.е. диаметр даже увеличивается). Для ячеек,



Р и с. 1. Продольный разрез блока графитовой кладки

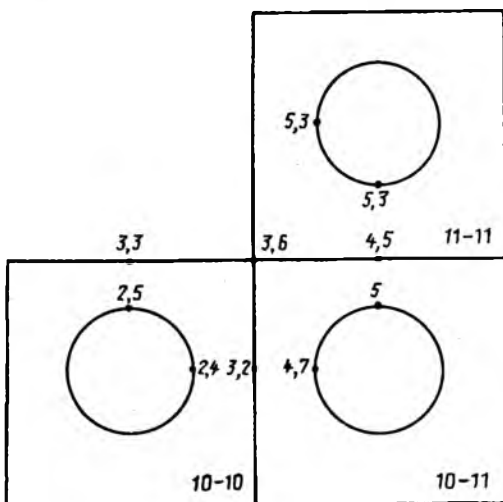


Р и с. 2. Фрагменты данных измерения диаметра отверстий в трех характерных ячейках графитовой кладки в двух взаимно перпендикулярных направлениях (1, 2) для нескольких графитовых блоков центральной по высоте части активной зоны (для ячейки 10—11 направление 2 — на каналы СУЗ, все остальные измерения ориентированы на ТВС)

к граням которых примыкают только ячейки с ТВС, деформация торцевых выступов примерно одинакова в обоих взаимно перпендикулярных направлениях. Для ячейки с каналом СУЗ деформация торцевых выступов не приводит к уменьшению диаметра отверстия: они наклоняются в другую сторону.

Характер деформации торцевых выступов графитовых блоков, примыкающих двумя противоположными гранями к ячейкам с каналами СУЗ, и графитовых блоков, все четыре грани которых примыкают к ячейкам с ТВС, невозможно объяснить различием в распределении температуры (перепад температуры по блокам слишком мал). Однако различие в распределении флюенса быстрых нейтронов по сечению графитовых блоков в этих случаях значительно, что иллюстрируется рис. 3 для ячеек 11—11 (окружена ТВС), 10—11 (с двух сторон находятся ячейки с каналами СУЗ) и 10—10 (ячейка с каналом СУЗ окружена ячейками с ТВС).

Для расчета флюенса быстрых нейтронов (энергия нейтронов $E > 0,18$ МэВ) была применена простая модель: ТВС заменяли нитевидными источниками нейтронов деления, распространяющимися в графите в соответствии с теорией непрерывного замедления. При этом учитывали и нейтроны первого пробега. Для любой точки центрального по высоте активной зоны сечения любой ячейки кладки реактора определяли суммарный вклад быстрых нейтронов от ТВС, эксплуатировавшейся в каждой из 273 ячеек. Наличие на магнитных носителях стационарных ЭВМ архива данных о движении ядерного топлива, который содержит историю перемещения ТВС, когда-либо поступившей на станцию [2], значительно облегчило эту задачу.



Р и с. 3. Расчетный флюенс быстрых нейтронов (в единицах 10^{21} см^{-2}) в 10 характерных точках ячеек 11—11, 10—11 и 10—10 реактора четвертого энергоблока по состоянию на 1.08.90 г.

Из рассмотрения данных рис. 3 видно, что азимутальная неравномерность интегрального нейтронного облучения внутренней поверхности отверстий в графитовых блоках невелика (не более 5%), отличие в облучении граней блока доходит до 40%, облучение внутренней поверхности блока и граней, расположенных между ТВС и между ТВС и каналом СУЗ, отличается на 10 и почти на 50% соответственно.

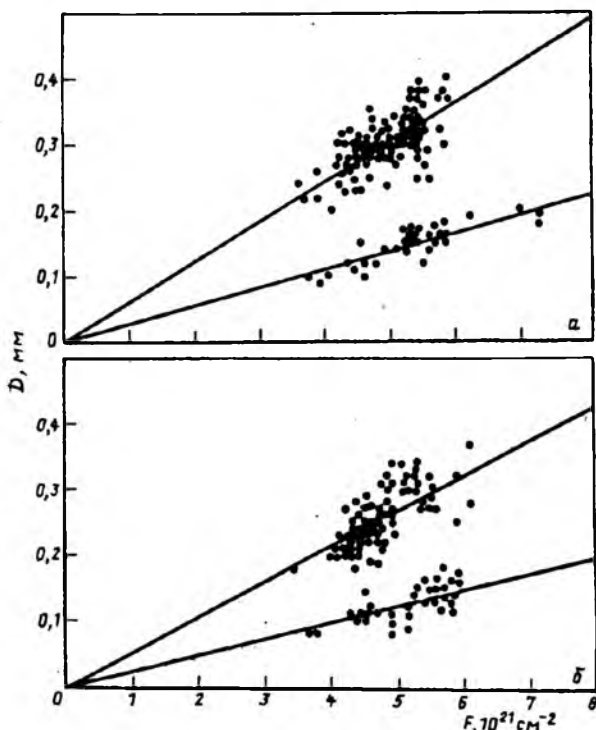
Условия в ЭГП-6 таковы, что с ростом облучения геометрические размеры графитовых блоков уменьшаются [3, 4]. Неравномерное облучение наружной и внутренней поверхностей приводит к неодинаковому по сечению блока уменьшению высоты и соответственно искривлению верхней и нижней граней. Так, для ячеек 11—11 и 10—10 в первом приближении верхняя грань приобретает форму кругового конуса, причем для ячейки 11—11 его вершина направлена вниз (внутренние слои блока сжаты сильнее наружных), для ячейки 10—10 — вверх (внутренние слои сжаты сильнее наружных). Должен стремиться к соответствующему наклону и торцевой кольцевой выступ: для ячейки 11—11 — в направлении к оси ячейки, для ячейки 10—10 — в противоположном направлении.

Еще одной причиной наблюдаемых искривлений торцевого выступа является сдерживающее влияние на уменьшение диаметра отверстия в теле графитового блока менее облученных наружных его слоев, эффекта, отсутствующего при усадке кольцевого выступа.

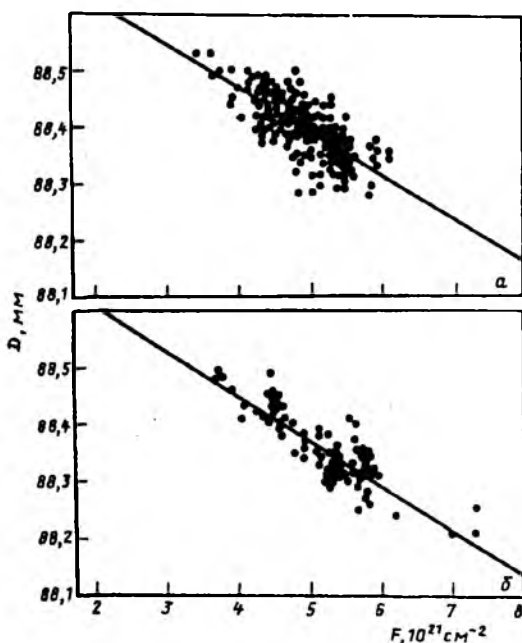
Для ячейки 10—11 верхняя грань также приобретает форму конуса, но не кругового, так как имеется существенная азимутальная неравномерность в интегральном нейтронном облучении. В направлении «на каналы СУЗ» верхняя грань, соответственно и торцевой выступ больше наклоняются, чем в перпендикулярном направлении. Это приведет к изменению формы поперечного сечения выступа: из кругового кольца оно перейдет к эллиптическому, а это вызовет уменьшение диаметра в направлении «на каналы СУЗ» и увеличение диаметра в перпендикулярном направлении, что также подтверждается измерениями.

Результаты измерений обрабатывали методом наименьших квадратов. Зависимость от флюенса быстрых нейтронов аппроксимировали прямой, причем для деформации кольцевого выступа — прямой, проходящей через начало координат, для диаметра отверстия в теле графитового блока не вводили ограничений на уравнение прямой из-за большого допуска на его размер при изготовлении графитовых блоков (+0,1 мм) и отсутствия измерения этого диаметра перед началом работы реакторов (рис. 4—6). Для прогнозирования уменьшения диаметра отверстий в графитовой кладке аппроксимация результатов измерения проводится отдельно для каждого реактора, чтобы исключить влияние систематической погрешности определения флюенса нейтронов, возможно, различной для разных реакторов. Здесь же для демонстрации максимально возможного количества измерений их результаты, полученные на различных реакторах, сгруппированы.

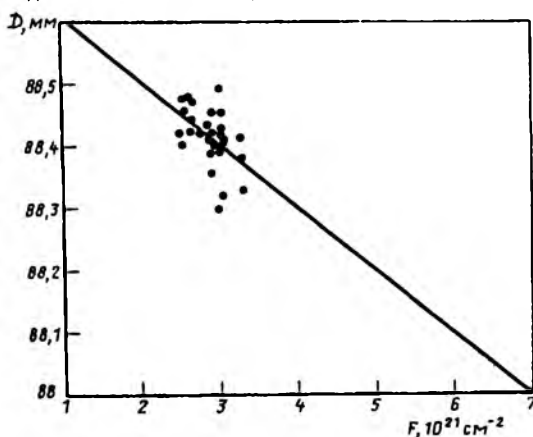
Как следует из приведенных данных, наибольшее сужение отверстия в столбах графитовой кладки происходит в местах расположения кольцевых выступов, и поэтому в этих областях раньше, чем в других, может произойти защемление ТВС. Ниже описывается упрощенная расчетная модель и приводятся результаты



Р и с. 4. Зависимость от флюенса быстрых нейтронов уменьшения диаметра отверстия в ячейках в результате деформации торцевых выступов блоков в реакторе первого, третьего (а) и второго, четвертого энергоблоков (б)



Р и с. 5. Зависимость от флюенса быстрых нейтронов диаметра отверстия в ячейках ТВС в реакторах первого—четвертого энергоблоков при расположении ячеек между двумя каналами СУЗ (а) и в случае содействия только с ТВС (б)



Р и с. 6. Зависимость от флюенса быстрых нейтронов диаметра отверстия в ячейках каналов СУЗ в реакторах первого—четвертого энергоблоков

производных от перемещения $w(z)$. Для постановки граничных условий на нижнем торце оболочки (при $z = 0$) проведем следующие рассуждения.

Как уже отмечалось, механизм, объясняющий наблюдаемый характер деформации кольцевых выступов, может быть сведен в основном к двум процессам:

неоднородному по сечению блока уменьшению его высоты, приводящему (для блоков с ТВС) к наклону образующей нижнего торца кольцевого выступа в сторону оси блока;

неодинаковому по высоте выступа уменьшению его диаметра из-за сдерживания этого снижения в нижней его части уменьшенной усадкой наружных слоев графитового блока, подвергающихся меньшему нейтронному облучению.

оценки возникающего при этом дополнительного усилия извлечения ТВС из реактора.

Кольцевой выступ заменяется круговой оболочкой длиной L , толщиной h и радиусом r . Влияние самого графитового блока на деформацию оболочки учитывается постановкой соответствующих граничных условий на нижнем торце оболочки ($z = 0$).

Для осесимметричной деформации круговой цилиндрической оболочки система уравнений, описывающая деформацию в рамках моментной теории и терминах перемещений, сводится к одному дифференциальному уравнению 4-го порядка [5, 6] относительно радиального перемещения срединной поверхности оболочки $w(x)$:

$$dw^4/dz^4 + 4\beta^4 W = P/D, \quad (1)$$

где $w(z)$ — радиальное перемещение поверхности оболочки; $\beta^4 = 3(1 - \nu^4)h^{-2}r^{-2}$ (ν — коэффициент Пуассона); $D = (Eh^3)/[12(1 - \nu^2)]$ (E — модуль упругости); $p(z)$ — внешняя нагрузка на оболочку.

Все четыре корня характеристического полинома уравнения (1) оказываются одинаковыми по модулю и выражаются формулой $\lambda = \pm(1 \pm i)\beta$. При этом общее решение однородного уравнения может быть записано в виде $w = \exp \beta z (C_1 \cos \beta z + C_2 \sin \beta z) + \exp(-\beta z) (C_3 \cos \beta z + C_4 \sin \beta z)$.

Для определения неизвестных коэффициентов используются граничные условия. На свободном конце оболочки (при $z = L$) граничные условия сводятся к требованию равенства нулю второй и третьей

Первый из этих процессов моделируется заданием на нижнем торце выступа производной от перемещения dw/dz , второй — заданием самого перемещения W (сдерживание уменьшения диаметра отверстия может быть для целей этого рассмотрения замснено соответствующим увеличением диаметра):

$$dw/dz = \gamma; \quad W = \xi. \quad (2)$$

Предположим, что с учетом сужения диаметра отверстия в блоке деформация выступа при отсутствии внешней нагрузки такова, что ТВС, находящаяся в кладке, испытывает давление со стороны кольцевого выступа. Для определенности предположим, что диаметр отверстия в верхней части кольцевого выступа стал меньше диаметра ТВС на δ . Наличие ТВС не дает диаметру уменьшиться на это значение, поэтому между ТВС и кольцевым выступом блока возникает усилие. Предположив, что касание выступа и ТВС реализуется на малом участке выступа, представим возникающее усилие $p(z)$ в виде $p(z) = N \operatorname{sh} \alpha z$, где α — достаточно большое значение, например, 2 см^{-1} .

Величину A выберем из требования необходимости увеличения диаметра в верхней части кольцевого выступа под действием $p(z)$ на δ . Усилие извлечения ТВС из такой ячейки возрастает за счет возникших под действием $p(z)$ сил трения. При коэффициенте трения $\eta = 0,1$ и $\delta = 0,1 \text{ мм}$ возникнет дополнительное усилие извлечения ТВС около $1,4 \text{ кН}$ (расчеты выполняли при $E = 10 \text{ ГПа}$, $\nu = 0,3$, $h = 1,56 \text{ см}$, $r = 5,21 \text{ см}$, $L = 5 \text{ см}$, а исходная деформация моделировалась условиями (2) при $\xi = 0,01 \text{ см}$ и $\gamma = -0,002$).

Для случая неосесимметричной деформации (когда ячейка с ТВС имеет по соседству две ТВС и два канала СУЗ) уравнений, разрешенных относительно радиального перемещения $w(z, 0)$ деформации оболочки, в литературе нами не найдено, и поэтому были проведены необходимые преобразования общей системы уравнений (3.32) [5] моментной теории круговой оболочки в терминах перемещений. Персмещения u , v и w (вдоль оси оболочки, по азимуту и радиусу соответственно) с учетом имеющейся симметрии были представлены в виде разложений

$$\begin{aligned} u(z, 0) &= \sum_{m=0}^{\infty} U_m(z) \cos 2m\varphi; \\ v(z, 0) &= \sum_{m=0}^{\infty} V_m(z) \sin 2m\varphi; \\ w(z, 0) &= \sum_{m=0}^{\infty} W_m(z) \cos 2m\varphi. \end{aligned} \quad (3)$$

Подстановка разложений (3) в исходную систему уравнений (3.35) [5] и проведение необходимых преобразований, воспроизвести которые здесь не представляется возможным, позволяет свести систему к системе дифференциальных уравнений 4-го порядка относительно $W_m(z)$:

$$d^4 W_m / dz^4 - 2A_m d^2 W_m / dz^2 + B_m W_m = P_m / D \quad (m = 0, 1 \dots). \quad (4)$$

При $m = 0$ уравнение (4) совпадает с соотношением (1) ($A_m = 0$, $B_m = 4\beta^4$). При $m > 0$

$$\begin{aligned} A_m &= (2m/r)^2 \left(1 + \frac{(1+\nu)(1-\nu+4km^2)}{4m^2 S_2} \right); \\ B_m &= 4\beta^4 \left(1 - S_1/S_2 \right) + 4m^2/r^4 \left(4m^2 + \nu - (1+\nu) S_1/S_2 \right), \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} S_1 &= 2(1 + 4km^2) + (1 + k)(1 - \nu)\nu - (1 + \nu)\nu; \\ S_2 &= (1 + k)[2 + (1 - \nu)\nu] - (1 - \nu)\nu; \\ k &= h^2/12r^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Можно показать, что $A_m > B_m$ при $m > 0$. Поэтому все корни характеристического полинома уравнения (4) действительные и различные: $\lambda_n^{(m)} = \pm \sqrt{A_m \pm \sqrt{A_m^2 - B_m}}$ ($n = 1, 2, 3, 4$).

Общее решение однородного уравнения для W_m ($m > 0$) может быть записано в виде $W_m(x) = \sum_{n=1}^4 C_n^m \exp \lambda_n^m z$, где C_n^m — произвольные постоянные.

Граничные условия на нижнем торце оболочки задавались аналогично формулам (2), но при этом предполагалось, что γ и ξ зависят от азимутального угла:

$$\begin{aligned} \gamma &= \gamma_0 + \gamma_1 \cos 2\varphi; \\ \xi &= \xi_0 + \xi_1 \cos 2\varphi, \end{aligned} \quad (6)$$

что моделировало несосесимметричную деформацию.

На верхнем, свободном торце оболочки граничные условия после громоздких преобразований свелись к следующим требованиям:

$$\begin{aligned} d^2 W_m / dz^2 - \nu / r^2 \left((4m^2 - S_1 / S_2) / [1 + (2k\nu / S_2)] \right) W_m &= 0; \\ d^3 W_m / dz^3 - 1 / r^2 \left((4m^2 - 0,5(1 + \nu) S_1 / S_2) / \{1 - [(1 + \nu)k / S_2]\} \right) dW_m / dz &= 0, \end{aligned}$$

где k , S_1 , S_2 определены в уравнении (5).

Внешняя нагрузка моделировалась разложением: $p(z, \varphi) = (0,375 + 0,5\cos 2m\varphi + 0,125\cos 4m\varphi) N \sin \alpha z$.

Расчет, проведенный как и в случае осесимметричной деформации ($\eta = 0,1$, $\delta = 0,1$ мм), показал, что дополнительное усилие извлечения ТВС за счет трения о деформированный торцевой выступ составит 150 Н (в 10 раз меньше, чем в случае осесимметричной деформации, и в 10 раз меньше массы ТВС). Исходная деформация оболочки моделировалась условиями (6) при $\xi_0 = 0,01$ см, $\xi_1 = -0,002$ см, $\gamma_0 = -0,002$, $\gamma_1 = -0,0001$.

Столь пристальное внимание к уменьшению диаметра отверстий в ячейках графитовой кладки на Билибинской АЭС вызвано тем, что после выявления аномальной деформации графитовых блоков, расположенных между каналами СУЗ, стала очевидной необходимость его восстановления. Но самое простое решение — остановить реактор, выгрузить ТВС, восстановить диаметр отверстий в каждой ячейке и снова загрузить ТВС — для Билибинской АЭС неприемлемо, ибо проектом не предусмотрена загрузка отработавших ТВС в реактор, поэтому и перегрузочная установка предназначена только для выгрузки ТВС, ее использование для загрузки отработавшего топлива потребовало бы усовершенствования. Кроме того, не хотелось изменять условия эксплуатации ТВС, при которых получен уникальный результат — ни одного выхода из строя ТВС за все время эксплуатации АЭС. Анализ данных, получаемых на основе прогнозирования уменьшения диаметра отверстий в ячейках графитовой кладки, и потребовавшееся изменение процедуры планирования перегрузки ТВС для учета этих данных на основе понимания основных закономерностей поведения графита позволили разрешить проблему без загрузки отработавшего топлива в реактор. При этом эконо-

мические потери, возникшие из-за необходимости досрочного извлечения нескольких ТВС при проведении плановых частичных перегрузок топлива, оказались небольшими. К настоящему времени при плановых перегрузках восстановлен диаметр в 848 ячеек из общего их числа 1092. Прогноз показывает, что извлечение ТВС из ячеек, оставшихся с невосстановленным диаметром, при очередных перегрузках ТВС не составит трудностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комиссаров О.В., Логоша Н.И., Минашин М.Е. и др. Температурный режим графитовой кладки реакторов Билибинской АТЭЦ. — Атомная энергия, 1980, т. 48, вып. 5, с. 287—291.
2. Акимов И.С., Дашковский Е.В., Рыбаков В.Г. и др. Применение ЭВМ СМ-3 на Билибинской АЭС для физико-технических расчетов реакторов, ведения архивов данных и перспективы ее использования в составе измерительно-вычислительного комплекса. — В сб.: Атомные электрические станции, вып. 7. М.: Энергоатомиздат, 1984, с. 70—77.
3. Гончаров В.В., Бурдаков Н.С., Виргильев Ю.С. и др. Действие облучения на графит ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1978.
4. Барабанов В.Н., Виргильев Ю.С. Радиационная ползучесть конструкционного графита. М.: Атомиздат, 1976.
5. Колкунов Н.В. Основы расчета упругих оболочек. М.: Высшая школа, 1987.
6. Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности. М.: Высшая школа, 1990.

Поступила в Редакцию 8.09.95

УДК 669.14:666.046.516:539.12.04

РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ КОРПУСНОЙ СТАЛИ, ЛЕГИРОВАННОЙ НИКЕЛЕМ

*Николаев Ю.А., Королев Ю.Н., Крюков А.М., Левит В.И., Николаева А.В.,
Чернобаева А.А., Вишкарёв О.М., Носов С.И. (РНЦ «Курчатовский ин-т»)*

Нейтронное облучение, как известно, изменяет механические свойства и структурно-фазовое состояние материалов корпусов реакторов. Среди основных факторов, влияющих на их охрупчивание под облучением, можно выделить химический состав и структурное состояние, температуру облучения, флюенс, плотность потока и параметры спектра быстрых нейтронов. В настоящее время нет теории, которая позволила бы связать и объяснить экспериментальные данные о радиационной повреждаемости корпусных материалов, накопленные более чем за 30 лет исследований. Создание единой теории радиационного охрупчивания затрудняется как сложным, комплексным взаимодействием металлургических факторов и условий облучения, так и наличием синергетических эффектов влияния примесей и легирующих элементов на радиационную чувствительность материалов. Таким образом, представляется оправданным применение методов статистического анализа к изучению основных тенденций влияния легирующих элементов и остаточных примесей на склонность материалов корпусов реакторов к охрупчиванию под облучением.

Методика, материалы и условия облучения. В настоящей работе исследованы 14 различных материалов, легированных никелем, в том числе шесть сварных швов и восемь плавок основного металла, следующего химического состава, % по массе: