

рамках международного сотрудничества выполнить проработки проекта БГР, опирающиеся на разработанные ранее и представленные в настоящей статье концепции.

Работа выполнена по гранту поддержки ведущих научных школ № 00-15-99020.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров А.П., Пономарев-Степной Н.Н. Атомная энергетика и научно-технический прогресс. — В кн.: Атомной энергетике XX лет. М.: Атомиздат, 1974, с. 205—213.
2. Пономарев-Степной Н.Н., Глушков Е.С., Демин В.Е. и др. Топливные циклы при развитии атомной энергетике с использованием высокотемпературных гелиевых реакторов на быстрых и тепловых нейтронах. — Атомно-водородная энергетика и технология, вып. 1. М.: Атомиздат, 1978, с. 134—149.
3. Кирушин А.И., Пономарев-Степной Н.Н., Глушков Е.С. и др. Роль и место газоохлаждаемых реакторов в структуре ядерного энергоснабжения. — Атомная энергия, 1999, т. 87, вып. 2, с. 87—91.
4. Веселов В.М., Ганев И.Х., Глушков Е.С. и др. Исследование нейтронно-физических характеристик быстрого гелиевого реактора на критическом стенде КОБРА. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов, 1984, вып. 6(43), с. 63.
5. Фейнберг С.М. Бридеры с газовым теплоносителем как альтернатива жидкометаллическому теплоносителю. Идеология жесткого и мягкого спектров. Доклад на совещании экспертов МАГАТЭ по быстрым реакторам с газовым теплоносителем. Минск, 1972, Gas-Cooled Fast Reactors. Vienna: IAEA-154, 1973, p. 21—63.
6. Пономарев-Степной Н.Н., Глушков Е.С., Гребенник В.Н. и др. Инженерно-физические проблемы быстрых реакторов-размножителей с газовым теплоносителем. — Там же, р. 191—235.
7. Глушков Е.С., Гребенник В.Н., Пономарев-Степной Н.Н. и др. Улучшение бридинга горючего в БГР. — Вести академии наук БССР, сер. Физико-энергетических наук, 1982, № 3, с. 29—33.
8. Емельянов И.Я., Завадский М.И., Пономарев-Степной Н.Н. и др. Конструктивные особенности реакторной установки опытно-промышленной АЭС БГР-300 с гелиевым теплоносителем. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Атомно-водородная энергетика и технология, 1980, вып. 2(7), с. 3.
9. Сметанников В.П., Ганев И.Х., Колганов В.Д. и др. Проектирование энергетических установок с высокотемпературными газоохлаждаемыми реакторами. М.: Энергоатомиздат, 1981.

Поступила в Редакцию 31.01.03

УДК 621.039.5

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ВИГНЕРА И ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРАФИТА ВЫТЭСНИТЕЛЕЙ СУЗ РБМК

*Платонов П.А., Бурлаков Е.В., Чугунов О.К., Достов А.И., Алексеев В.М.,
Смородкин Е.И. (РНЦ «Курчатовский ин-т»)*

Исследованию накопленной (запасенной) энергии в графитовых элементах уран-графитовых реакторов посвящено много работ как у нас в стране, так и за рубежом [1—4]. Природа накопленной энергии пока до конца не изучена, но все исследователи склоняются к мысли, что это прежде всего упругая энергия кристаллической решетки, связанная с ее искажением за счет образующихся в ней радиа-

ционных дефектов. Важно знать как общее количество накопленной энергии в различных элементах активной зоны реакторов, так и возможность ее спонтанного выделения в случае аварийных ситуаций и резкого повышения температуры графитовых деталей.

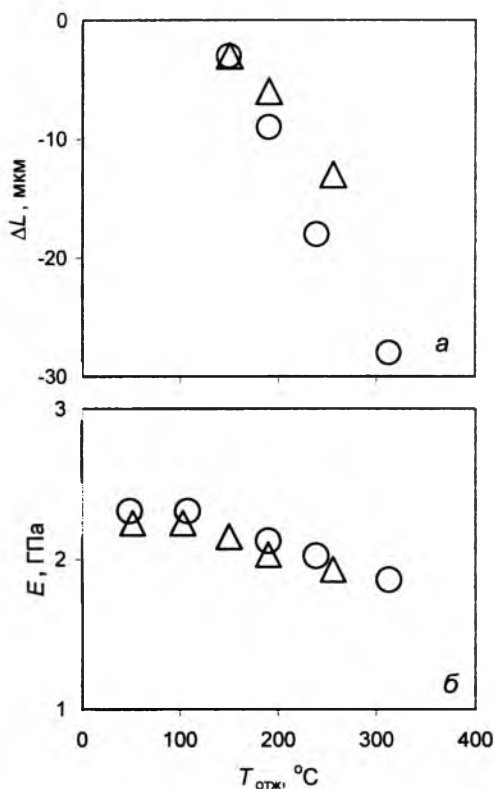
Общее количество запасенной энергии можно оценить, если точно знать условия облучения графита. По оценкам ее максимальное количество может достигать 600 кал/г ($25 \cdot 10^5$ Дж/кг) при температуре облучения ниже 100 °С. Однако расчет кинетики ее выделения в конкретных деталях графитовой кладки является сложной динамической и нелинейной задачей.

Как справедливо указывается в работе [2], которая является по существу постановочной для проведения настоящих исследований, моделирование характера накопления и выделения запасенной энергии в конкретных конструкциях затруднено вследствие того, что при этом необходимо детально знать как условия облучения графитовых конструкций (флюенс нейтронов и температуру облучения), так и характер изменения физико-механических свойств графита в процессе ее выделения в различных точках по всему объему детали. Прежде всего это касается теплопроводности.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию физико-механических свойств и количества накопленной энергии в графите вытеснителя каналов СУЗ РБМК 2-го энергоблока Курской АЭС и оценке скорости ее выделения в случае разогрева графита.

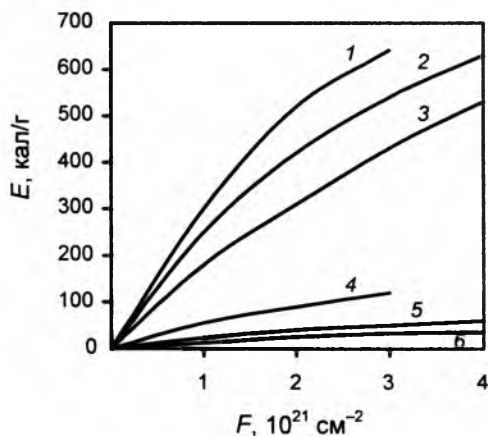
Определение условий облучения графитового вытеснителя (флюенса нейтронов и температуры). Стержень ручного регулирования системы СУЗ (заводской № Т2264) был установлен в ячейку 52-35 15 ноября 1992 г. и извлечен из реактора 25 октября 1999 г. Общее время работы стержня — 6,5 календарных лет. В 2002 г. графитовый вытеснитель этого стержня был доставлен в РНЦ «Курчатовский ин-т» для исследования. Флюенс повреждающих быстрых нейтронов ($E > 0,18$ МэВ) для графитового вытеснителя рассчитывали по программе ФЛЮЕНС [5]. Эта программа позволяет рассчитывать флюенс нейтронов для любой координаты деталей графитовой кладки РБМК по энерговыработке в соответствующей ячейке (с учетом энерговыработок в соседних ячейках). В нашем случае была использована суммарная энерговыработка в восьми соседних с СУЗ ячейках рабочих каналов за время работы стержня ручного регулирования, МВт·сут: 51-36 — 2698, 51-35 — 2451, 51-34 — 2600, 52-36 — 2750, 52-35 — 0, 52-34 — 2450, 53-36 — 2790, 53-35 — 2654, 53-34 — 2837. Расчетный флюенс нейтронов для четырех точек по азимуту на внутренней поверхности графитового блока ячейки 52-35 составляет $(0,85 — 0,87)10^{21}$ см⁻². С учетом точности самого расчета можно считать, что его азимутальное распределение равномерное, как и следовало ожидать, исходя из примерно одинаковой энерговыработки в соседних ячейках реактора. Расчетные соотношения плотности потока быстрых нейтронов для самого вытеснителя и внутренней поверхности графитового блока канала СУЗ равны 0,9. Тогда, исходя из полученных данных, флюенс нейтронов для графита вытеснителя должен составить $\sim 0,75 \cdot 10^{21}$ см⁻².

Температуру графитового вытеснителя оценивали путем 3-часовых изохрональных отжигов образцов графита через определенные интервалы температуры (50—100 °С) с последующим измерением соответствующих свойств графита (раз-



Р и с. 1. Изменение длины (а) и модуля упругости (б) облученного образца № 32 (Δ) и 12 ($\circ$) в процессе отжига

Определение общего количества запасенной энергии. Запасенную энергию оценивали по изменению параметра c кристаллической решетки графита с учетом знания условий облучения графита вытеснителя. Многочисленными экспериментами были установлены надежные корреляционные зависимости между условиями облучения (температурой, флюенсом нейтронов) и общей запасенной энергией (рис. 2). По полученным данным, используя корреляционные зависимости, суммарная запасенная энергия в исследуемой части графитового вытеснителя оценена равной 180—200 кал/г ($8,4 \cdot 10^5$ Дж/кг).



Р и с. 2. Зависимость запасенной энергии от флюенса нейтронов при температуре облучения 30 (1), 100 (2), 200 (3), 300 (4), 400 (5), 750 °C (6)

мера образцов, параметров кристаллической решетки, модуля упругости и др.). Температура, при которой свойства начинают изменяться, и является температурой облучения. Это стандартная методика, и она обычно применяется при определении энергии активации отжига радиационных дефектов в облученном графите [6].

Для определения температуры облучения были выбраны два образца (№ 12 и 32) с наибольшим и наименьшим изменением параметров кристаллической решетки графита (рис. 1). Полученные результаты показывают, что отжиг (изменение свойств) облученного графита вытеснителя начинается с температуры -100 °C, т.е. тогда, когда температура отжига превышает температуру облучения на 20—50 °C (в зависимости от условий облучения). Таким образом, можно надежно утверждать, что температура вытеснителя в процессе его работы в среднем не превышала 50—80 °C.

В дальнейшем будут проведены эксперименты по непосредственному калориметрическому определению запасенной энергии для различных участков графитового вытеснителя и определена кинетика ее выделения в зависимости от температуры отжига графита.

Исследование физико-механических свойств графита вытеснителя. Графитовый вытеснитель представляет собой стержень диаметром 66, длиной 500 мм, установленный в алюминиевую оболочку (рис. 3). Он изготовлен из втулочного реакторного графита марки ГР-93 на основе нефтяного кокса КНПС и каменноугольного пека. Его сходные свойства следующие:

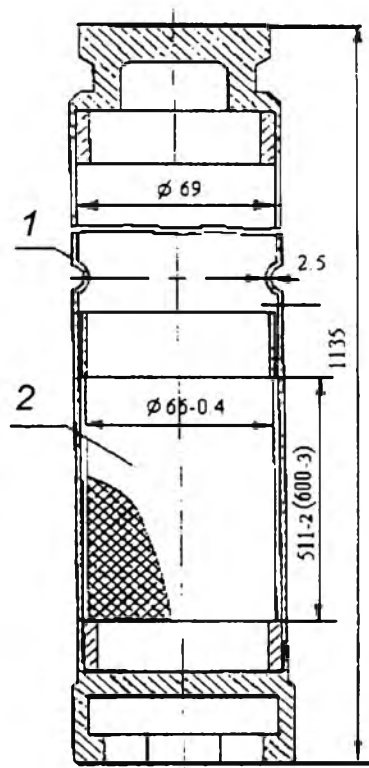
Плотность, г/см ³ ...	1,69
Модуль упругости, 10 ⁴ МПа ...	0,97/0,68
Прочность при сжатии, МПа ...	36/36
Прочность при растяжении, МПа ...	8,1/8,1
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С) ...	103/89
Коэффициент теплового расширения, 10 ⁻⁶ °С ...	4,2/5,4
Удельное электросопротивление, 10 ⁻⁶ Ом·м ...	10,3/14,5
Параметр кристаллической решетки <i>c</i> , нм ...	0,675
<i>a</i> , нм ...	0,2461

В числителе — свойства в направлении, параллельном оси формования, в знаменателе — в перпендикулярном.

Размеры образцов были выбраны согласно отраслевому стандарту [7]. Образцы диаметром 6 мм, длиной 40—50 мм высверливали полый фрезой из центральной части графитового стержня, который был распилен пополам, с очень небольшими усилиями резания, чтобы минимизировать нагрев образцов в процессе высверливания. Образцы выпиливали как по окружности стержня для оценки возможной существенной неоднородности свойств по азимуту стержня (номера образцов 2—32), так и по диаметру стержня (образцы Д-2—Д-14), чтобы оценить изменение свойств графита в радиальном направлении. Таким образом, все образцы были параллельной вырезки. Образцы маркировали, чтобы зафиксировать азимутальную координату и место высверливания.

Исследование параметров кристаллической решетки. Параметры кристаллической решетки графита образцов определяли рентгеновским методом [6] с использованием монохроматического K_{α} -излучения для железа по рентгеновским линиям (002) для параметра *c* и линии (110) для параметра *a* (табл. 1).

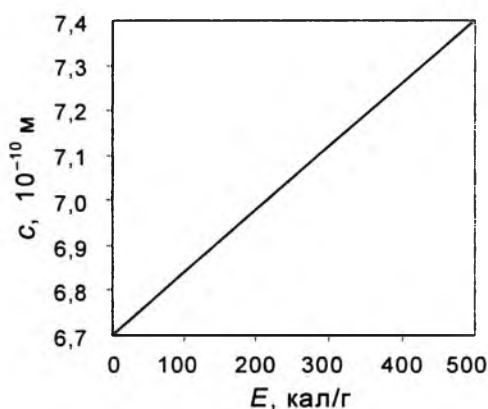
Из результатов измерений следует, что параметры кристаллической решетки графита образцов вытеснителя изменяются согласно общим закономерностям при нейтронном облучении: параметр *c* возрастает, *a* — уменьшается. Важный результат получен с точки зрения распределения температуры графита по сечению вытеснителя. Так, для образцов, высверленных по диаметру (образцы Д-2—Д-14), из-



Р и с. 3. Элемент вытеснителя: 1 — алюминиевый сплав; 2 — графит марки ГР-93

Таблица 1. Параметры кристаллической решетки образцов графита вытеснителя

Номер образца	Параметр c , нм	Параметр a , нм	$\Delta c/c$, %	$\Delta a/a$, %
2	0,707	0,245	4,7	-0,43
4	0,706	0,245	4,57	-0,44
10	0,706	0,245	4,57	-0,43
12	0,706	0,245	4,63	-0,44
20	0,706	0,245	4,63	-0,44
22	0,706	0,245	4,63	-0,46
30	0,706	0,245	4,57	-0,44
32	0,705	0,245	4,44	-0,46
Д-2	0,705	0,2445	4,37	-0,45
Д-4	0,706	0,245	4,44	-0,45
Д-6	0,704	0,245	4,22	-0,45
Д-8 (центр)	0,705	0,2451	4,22	-0,41
Д-10	0,705	0,245	4,22	-0,43
Д-12	0,705	0,245	4,25	-0,43
Д-14	0,706	0,245	4,44	-0,43

Рис. 4. Корреляция между запасенной энергией и параметром c кристаллической решетки графита

По результатам измерений параметра c кристаллической решетки графита можно также оценить общее количество запасенной в нем энергии Вигнера. Согласно рис. 4, обобщающему многие исследования по корреляции между накопленной энергией и изменениями этого параметра, можно установить, что запасенная энергия в графите вытеснителя составляет 200—220 кал/г, что соответствует ранее сделанным оценкам.

Исследование физико-механических свойств графита. Эта же серия образцов была использована для измерения физико-механических свойств графита (табл. 2).

По результатам измерений можно заключить, что плотность графита возросла примерно на 3—4%, модуль упругости — примерно в 2 раза, коэффициент теплового расширения изменился незначительно.

менения параметров кристаллической решетки, особенно параметра c , наименьшие для центральной части вытеснителя и наибольшие для его периферийной части. Это напрямую экспериментально подтверждает наличие разности (перепада) температуры по сечению вытеснителя. Для количественного определения этой разницы необходимо проведение соответствующих расчетов температуры вытеснителя с использованием реально измеренных значений теплопроводности образцов графита, высверленных из различных участков вытеснителя. По результатам

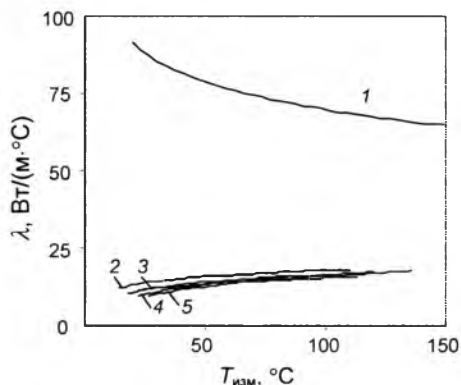
Таблица 2. Физико-механические свойства образцов графита вытеснителя

Номер образца	Плотность, г/см ³	Модуль упругости, ГПа	Удельное электро- сопротивление, 10 ⁻⁶ Ом·м	Коэффициент теплового расши- рения. 10 ⁻⁶ °C	Коэффициент теплопровод- ности, Вт/(м·°C)
2	1,77	22,2	29,86	3,9	16,2
4	1,75	20,1	27,2		
10	1,76	23,4	26,6		
12	1,74	19,3	25,5		
20	1,77	21,0	28,8		
22	1,77	22,8	26,7		17
32	1,77	19,4	25,7		17,9
Д-2	1,77	22,2	27,3		15,5
Д-4	1,76	21,5	28,0		17
Д-6	1,75	21,2	27,4		
Д-8 (центр)	1,74	21,3	27,9	4	17
Д-10	1,74	20,0	28,7		15,5
Д-12	1,75	20,9	28,7		17,5
Д-14			4	15,5	

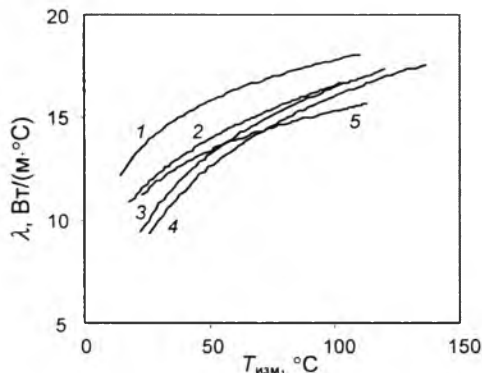
Примечание. Коэффициент теплового расширения указан для интервала 20—100 °C, коэффициент теплопроводности — для 100 °C (измерения проводили методом Кольрауша в стационарном режиме). Модуль упругости графита измеряли динамическим методом.

Особое внимание было уделено измерению коэффициента теплопроводности образцов графита различной вырезки. Согласно результатам измерений он изменился (уменьшился) существенно со 100 до 12—15 Вт/(м·°C) при температуре измерения 100 °C, причем изменился и характер его температурной зависимости — вместо «металлического» типа проводимости, когда с увеличением температуры измерения (T) он уменьшался, он стал возрастать — «полупроводниковый» тип проводимости (рис. 5). Такая зависимость хорошо аппроксимируется логарифмической или степенной функцией. Так, для образца № 30 (кривая 2 на рис. 6) эта зависимость хорошо аппроксимируется степенной функцией $\lambda = 5,381 T^{0,244}$.

Измерения коэффициента теплопроводности для серии образцов окружного направления показали, что он меняется и по азимуту стержня вытеснителя в диапазоне от 15 до 18 Вт/(м·°C) при 100 °C. При понижении температуры он становится еще меньше (10—12 Вт/(м·°C) (табл. 3). Это подтверждает предположение о неравномерности температурного поля по ази-



Р и с. 5. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности графита вытеснителя канала СУЗ: 1 — необлученный графит; 2—5 — образцы облученного графита вытеснителя



Р и с. 6. Коэффициент теплопроводности образца графита вытеснителя канала СУЗ № 32 (1), 30 (2), 22 (3), 10 (4), 20 (5)

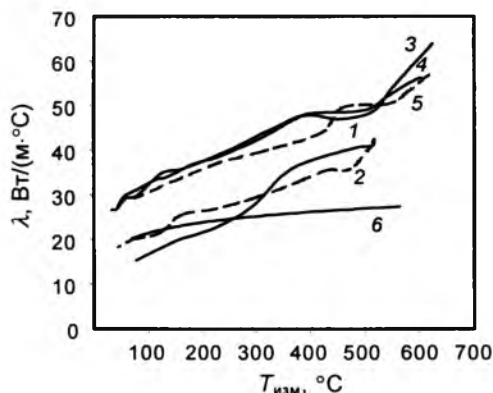
муту стержня, что, возможно, связано с эксцентриситетом в расположении стержня по отношению к оболочке трубы вытеснителя [2].

Т а б л и ц а 3. Зависимость коэффициента теплопроводности графита вытеснителя от температуры измерения

Номер образца	T, °C			
	30	50	70	100
10	12	14	15,1	16,2
20	12	13,3	14,3	15,0
22	12	14	15,3	17
30	10	12,5	14	15,3
32	14,3	15,5	17	17,9

Для оценки характера изменения коэффициента теплопроводности при повышении температуры выше температуры облучения была проведена серия экспериментов с отжигом образцов. Измерения теплопроводности двух образцов (№ 30 и 22) при повышении температуры сначала до 70 °C, затем при повторных измерениях до 120 °C (больше предположительной температуры облучения) не выявили существенного изменения коэффициента теплопроводности (рис. 7, кривые 3, 4). Измерения при более высокой температуре проводили следующим образом: сначала температуру образца повышали до 550 °C с интервалом примерно 50 °C. Затем с выдержкой при максимальной температуре в течение 3 ч измеряли этот параметр через каждый час (кривая 1), затем температуру понижали примерно с тем же шагом с проведением измерений (кривая 2). Таким образом, измеряли коэффициент теплопроводности непосредственно в процессе отжига (высвобождения запасенной энергии).

Потом этот образец отжигали в печи (в вакууме) в течение 3 ч при 750 °C. Измерения показали, что теплопроводность образца возросла почти в 2 раза во всем интервале температуры измерения (30—700 °C), причем наблюдается ее резкое увеличение (до 65 Вт/(м·°C) — вторичный скачок) при 580—650 °C (кривая 3). Затем образец повторно измерили как при повышении температуры до 650 °C (кривая 4), так и при его расхолаживании (кривая 5). Для сравнения на этом же рисунке приведена характерная температурная зависимость теплопроводности образцов графита (кернов), взятых из кладки 2-го энергоблока Курской АЭС (кривая 6).



Р и с. 7. Изменение теплопроводности образцов графита вытеснителя при отжиге

Анализ результатов измерений показывает, что теплопроводность меняется постадийно. Особенно это заметно при измерениях после выдержки при расхолаживании образца (см. кривую 2). Явно прослеживаются две стадии ускоренного увеличения коэффициента теплопроводности с последующим его замедлением — выходом на насыщение. Эти стадии наблюдаются при температуре измерения

100—180 и 390—420 °С. По известным данным при прямых калориметрических измерениях запасенной энергии отмечаются два самых мощных пика ее выделения именно при такой температуре.

Следует отметить, что в процессе отжига образца при максимальной температуре наблюдается монотонное увеличение коэффициента теплопроводности, на температурной зависимости (как при увеличении температуры образца, так и при его расхолаживании) выявились те же стадии его ускоренного изменения. С одной стороны, это указывает на надежность проводимых измерений (флуктуации теплопроводности не связаны с особенностями метода измерения и погрешностью самих измерений ± 5 —7%), с другой, свидетельствуют о том, что если флуктуации связаны с выходом запасенной энергии в этих температурных интервалах, то не вся запасенная энергия высвобождается даже при существенном превышении температурой отжига температуры облучения графита и при повторном нагреве образца она продолжает выделяться относительно небольшими порциями. Следует отметить также, что характер температурной зависимости теплопроводности не изменился даже после отжига при 750 °С, т.е. кристаллическая решетка графита еще сохраняет дефектную структуру и, по-видимому, необходимо повысить температуру отжига существенно (до 1500—1800 °С), чтобы отжечь все радиационные дефекты.

Расчетное определение температуры облучения графита вытеснителей СУЗ РБМК. Полученные в настоящей работе коэффициенты теплопроводности графита марки ГР-93 существенно отличаются от использованных ранее при анализе температурного режима вытеснителей СУЗ РБМК [2], а именно коэффициент теплопроводности облученного графита при флюенсе нейтронов 10^{21} см⁻² в области относительно низкой температуры (30—150 °С) равен 12—20 Вт/(м·°С), что в 3—5 раз выше значений, принимаемых ранее на основе экспертных оценок. Это обстоятельство требует дополнительных расчетных оценок температуры облучения графита.

Защитная оболочка блока вытеснителя представляет собой трубу из сплава на основе алюминия внутренним диаметром 69 мм и толщиной стенки $\delta_{об} = 2,5$ мм. Номинальный зазор между блоком и трубой составляет $\Delta_0 = 1,5$ мм. Коэффициент теплопроводности материала оболочки принят равным $\lambda_{об} = 175$ Вт/(м·°С) [8]. Теплопроводность газа в зазоре равна $\lambda_r = 0,029$ Вт/(м·°С). Вытеснитель располагается в канале СУЗ, который представляет собой трубу внутренним диаметром 82 мм. Вытеснитель охлаждается потоком воды кольцевого канала, образованного трубой вытеснителя и циркониевой трубой СУЗ. Температура воды на входе в канал 35 °С, на выходе 60 °С, давление в контуре 0,35—0,4 МПа. Средняя скорость воды составляет 5 м/с. Оценки показывают, что в этих условиях в качестве среднего коэффициента теплоотдачи от трубы вытеснителя к воде может быть принят $\alpha = 2,5 \cdot 10^3$ Вт/(м²·°С).

Температуру графита вытеснителя СУЗ определяли обычно при условии концентрического расположения блока в защитной оболочке. При этом расчетная температура блока для среднего линейного энерговыделения в графите $q_l = 420$ Вт/м и коэффициента теплопроводности блока $\lambda_{гр} = 4$ Вт/(м·°С) превышала 100 °С, что считалось безопасным с точки зрения накопленной энергии и ее возможного выде-

ления [9]. Однако условия сборки, транспортировки и установки вытеснителей в реакторе не гарантируют концентрического расположения блока относительно защитной трубы. Следовательно, эксцентрическое расположение блока должно рассматриваться как более вероятное. В работе [2] было показано, что при смещении блока относительно оси защитной трубы его средняя температура сильно снижается. Это удалось доказать путем сведения задачи определения температуры графита к исследованию температурного поля в графитовом блоке с внутренними источниками тепла и условиями на границе для конвективного теплообмена (условия третьего рода) с коэффициентом теплопередачи, изменяющимся на поверхности теплообмена по азимуту. Коэффициент теплопроводности графита считался при этом постоянным.

Основная идея, на основе которой определяются краевые условия в указанной задаче, состоит в следующем. При эксцентриситете газовый зазор δ , разделяющий блок и трубу вытеснителя, будет функцией азимутального угла φ и легко может быть определен геометрически. При малых значениях отношения ширины зазора к радиусу трубы выражение для δ согласно [2] имеет вид $\delta = \Delta_0(1 - \cos\varphi)$. Тогда для теплового потока с поверхности блока с хорошей точностью может быть использовано следующее соотношение:

$$q_F = \frac{(t_w - t_0)}{1/\alpha + \delta/\lambda_T + \delta_{об}/\lambda_{об}}.$$

Целесообразно привести математическую формулировку задачи. Температурное поле в блоке описывается уравнением

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \varphi^2} = -1. \quad (1)$$

Условие на границе задается в виде

$$\frac{\partial \theta}{\partial \rho} \Big|_{\rho=1} + \text{Bi}(\varphi)\theta(1, \varphi) = 0. \quad (2)$$

В этих уравнениях $\theta = (t - t_0)\lambda_{тр}/q_v r_0^2$ — безразмерная температура; $\text{Bi}(\varphi) = K(\varphi)r_0/\lambda_{тр}$ — критерий Био; $K(\varphi) = (1/\alpha + \delta/\lambda_T + \delta_{об}/\lambda_{об})^{-1}$ — коэффициент теплопередачи; q_v — мощность внутренних источников тепла; $\rho = r/r_0$ — безразмерный радиус; r — текущий радиус; r_0 — радиус графитового блока; t — температура графита; t_0 — температура охлаждающей среды; t_w — температура поверхности графитового блока.

Для температуры в центре блока $\vartheta(0)$ и средней температуры блока $\bar{\vartheta}$ получены следующие уравнения:

$$\vartheta(0) = \vartheta^*(0) + \vartheta^*(1)q/(1-q); \quad (3)$$

$$\bar{\vartheta} = \vartheta^* + \vartheta^*(1)q/(1-q). \quad (4)$$

В случае касания графитовым блоком трубы вытеснителя

$$q = 1 - K^0 / K^* \sqrt{1 - a^2},$$

где $K^0 = (1/\alpha + \delta_{об}/\lambda_{об} + \Delta_0/\lambda_T)^{-1}$ — коэффициент теплопередачи при концентрическом расположении блока; $K^* = 1/(1/\alpha + \delta_{об}/\lambda_{об})$; $a = \frac{\Delta_0/\lambda_T}{1/\alpha + \delta_{об}/\lambda_{об} + \Delta_0/\lambda_T}$;

$$\theta^* = 1/2Bi^* - \rho^2/4 + 1/4; Bi^* = K^*r_0/\lambda_{тр}.$$

Используя указанные геометрические и режимные параметры, были получены следующие числовые значения: $K^0 = 19,18 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, $K^* = 2,41 \cdot 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, $Bi^* = 6,6367$, $Bi^0 = 0,0527$, $a = 0,9921$, $q = 0,937$. Тогда в соответствии с уравнением (3) температура в центре блока

$$\vartheta(0) = \frac{1}{2 \cdot 6,6367} + \frac{1}{4} + \frac{1}{6,6367} 0,937 \left(\frac{1}{1 - 0,937} \right) = 2,5663$$

или, возвращаясь к размерным величинам:

$$t(0) = t_0 + 2,5663(q_l/\pi\lambda_p) = t_0 + 2,5663(420/3,14 \cdot 12) \cong t_0 + 28,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Средняя температура блока рассчитывается аналогично. Учитывая, что среднее значение $\vartheta^*(\rho)$

$$\overline{\vartheta^*} = \frac{1}{2Bi^*} + \frac{1}{8},$$

получим согласно уравнению (4)

$$\overline{\vartheta} = \frac{1}{2 \cdot 6,6367} + \frac{1}{8} + \frac{1}{6,6367} 0,937 \left(\frac{1}{1 - 0,937} \right) = 2,4413$$

и

$$\bar{t} = t_0 + 2,4413 \frac{q_l}{\pi\lambda_p} = t_0 + 2,4413 \frac{420}{3,14 \cdot 12} \cong t_0 + 27,2 \text{ } ^\circ\text{C},$$

т.е. средняя температура блока при максимальном эксцентриситете составляет менее $70 \text{ } ^\circ\text{C}$, если температура среды равна $40 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Найдем среднюю температуру блока при его концентрическом расположении. Для этого используем точное аналитическое решение задачи (1), (2):

$$\vartheta^0 = \frac{1}{2Bi^0} - \frac{\rho^2}{4} + \frac{1}{4}.$$

Тогда

$$\overline{\vartheta^0} = \frac{1}{2Bi^0} + \frac{1}{8} = \frac{1}{2 \cdot 0,0527} + \frac{1}{8} = 9,6167;$$

$$\bar{t}^0 = t_0 + 9,6167 \frac{q_l}{\pi\lambda_p} = t_0 + 9,6167 \frac{420}{3,14 \cdot 12} \cong t_0 + 107,2 \text{ } ^\circ\text{C},$$

т.е. средняя температура блока при концентрическом расположении $\sim 150 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Отношение средних безразмерных значений температуры блока при концентрическом расположении и максимальном эксцентриситете $\overline{\vartheta^0}/\overline{\vartheta} = 9,6167/2,4413 = 3,94$.

Таким образом, можно констатировать, что при смещении оси блока относительно оси защитной трубы происходит резкое снижение средней температуры блока. Для рассматриваемых условий в графитовом блоке могут, следовательно, существовать области с температурой намного ниже 70 °С. Очевидно, что и при меньшем эксцентриситете в графите вытеснителя могут также существовать области с низкой температурой.

Исследуем влияние зависимости коэффициента теплопроводности от температуры на температурное поле в графитовом блоке. В этом случае стационарное распределение температуры в блоке описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial \varphi} \right) = -q_v \quad (5)$$

при граничном условии

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial r} + K(\varphi)(t - t_0) = 0. \quad (6)$$

Поскольку коэффициент теплопроводности зависит от температуры, то он теперь не может быть выведен из-под знака дифференциального оператора. В условиях третьей краевой задачи это обстоятельство существенно осложняет решение задачи. В самом деле, применим преобразование Кирхгоффа $U = \int_t^{\cdot} \lambda(t) dt$, где t^* — некоторое произвольное значение. После подстановки переменной U в уравнение (5) и граничное условие (6) получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} &= -q_v; \\ \frac{\partial U}{\partial r} + K(\varphi)[t(U) - t_0] &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Очевидно, что граничное условие для рассматриваемой задачи нелинейно по U , и это является принципиальным отличием от первой и второй краевых задач. Не трудно показать, что t нелинейно зависит от U для любого вида зависимости коэффициента теплопроводности от температуры.

В качестве первого шага при решении задачи рассмотрим некоторую модельную линейную задачу, когда процесс изменения U подчиняется исходному дифференциальному уравнению, а на границе вместо нелинейного по U условия вводится краевое условие первого рода, при котором вид функции U заранее предписывается. Наиболее общим видом такой функции является функция от угловой координаты φ , т.е. полагаем, что при $r = r_0$ $U = f(\varphi)$.

Для некоторой заданной функции $f(\varphi)$, назовем ее $f_1(\varphi)$, решение такой задачи может быть получено аналитически в виде разложения в ряд по собственным функциям. Следующим шагом является установление связи этой модельной задачи с исходной. С этой целью перепишем граничное условие (7) в виде

$$t = t_0 - \frac{1}{K(\varphi)} \frac{\partial U}{\partial r}. \quad (8)$$

Производная в правой части этого уравнения находится из решения U модельной задачи. В результате температура на границе определяется в уравнении (8) как функция угла φ . Далее в соответствии с преобразованием Кирхгоффа существует единственная функция U , соответствующая каждому t , поскольку определена зависимость $\lambda(t)$. Следовательно, $t(\varphi)$, которое было только что определено из уравнения (8), может быть трансформировано в соответствующее $U(\varphi)$, которое обозначим как $f_1^*(\varphi)$. Из сказанного ясно, что $f(\varphi)$ находится путем итерационной процедуры, которую можно определить следующим образом:

$$f_n(\varphi) = f_{n-1}(\varphi) + w[f_{n-1}^*(\varphi) - f_{n-1}(\varphi)]; \\ 0 < w \leq 1.$$

За сходимостью итерационного процесса можно следить по относительной разности температуры Δ в центре графитового блока, т.е. в точке с координатами $(0; 0)$: $\Delta = [U(0; 0)_{n+1} - U(0; 0)_n] / U(0; 0)_n$. Процесс итерации прекращается, когда разница становится меньше некоторого заранее заданного значения.

Изложенная методика может быть применена в случае эксцентрического расположения блока в защитной трубе. Это решение сложно, и его реализация выходит за рамки настоящей работы. Здесь ограничимся исследованием влияния температурной зависимости коэффициента теплопроводности только для бесконечного цилиндра с осевой симметрией.

В этом случае дифференциальное уравнение и краевое условие записываются в виде

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} = -q_v; \quad (9) \\ \frac{\partial U}{\partial r} + K^0[t(U) - t_0] = 0.$$

Для модельной задачи краевым условием является равенство

$$U|_{r=r_0} = C_1 = \text{const}. \quad (10)$$

Решение уравнения (9) при условии (10) имеет вид

$$U = C_1 + \frac{q_v r_0^2}{4} \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right].$$

Производная от U по r $dU/dr = -q_v r/2$. Тогда из уравнения (8) можем найти выражение для температуры $t = t_0 + q_v r/2K^0$. В интересующей нас области температуры 50—150 °С согласно полученным в настоящей работе данным коэффициент теплопроводности можно считать линейно зависимым от температуры. Примем для проведения оценок следующую зависимость:

$$\lambda = \lambda_0 + bt = 11 + 0,055t. \quad (11)$$

Для функции U , подставляя в преобразование Кирхгоффа эту зависимость коэффициента теплопроводности от температуры и полагая $t' = 0$, получим

$$U = \int_0^t (\lambda_0 + bt) dt = \lambda_0 t + \frac{1}{2} bt^2. \quad (12)$$

Подставляя в формулу (12) выражение (11) для температуры и полагая $r = r_0$, найдем новое значение U на границе области. Второе приближение для U модельной задачи запишется в виде

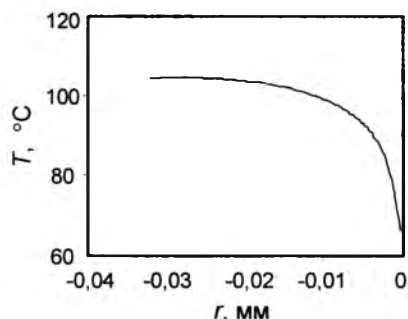
$$U = \lambda_0 \left(t_0 + \frac{q_v r_0}{2K^0} \right) + \frac{1}{2} b \left(t_0 + \frac{q_v r_0}{2K^0} \right)^2 + \frac{q_v r_0^2}{4} \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right]. \quad (13)$$

На этом процесс итераций заканчивается, поскольку последующее приближение для функции U на границе области будет совпадать с предыдущим. Подставляя в выражение (13) преобразование Кирхгоффа, получим уравнение для температуры в центре блока (t_c):

$$t_c^2 + 2 \frac{\lambda_0}{b} t_c - 2 \frac{\lambda_0}{b} \left(t_0 + \frac{q_v r_0}{2K^0} \right) - \left(t_0 + \frac{q_v r_0}{2K^0} \right)^2 - \frac{2}{b} \frac{q_v r_0^2}{4} = 0.$$

Используя указанные численные значения параметров, найдем окончательно: $t_c^2 + 400t_c - 80655 = 0$. Решая это квадратное уравнение, получим, что $t_c = 147^\circ\text{C}$. Это значение совпадает со средней температурой блока при концентрическом расположении блока. Это означает, что при указанной температурной зависимости коэффициента теплопроводности температура графита вытеснителя снижается. Учет этой зависимости при наличии эксцентриситета приводит также к сглаживанию неравномерности распределения температуры по блоку.

Возможность образования сильных перекосов поля температуры графитового блока при наличии эксцентриситета доказана также на основе численного решения нестационарного уравнения теплопроводности при граничных условиях третьего рода и постоянном коэффициенте теплопроводности. Задача решалась методом конечных разностей. Область интегрирования, которая представляет собой плоскость, ограниченную окружностью радиуса r_0 , разбивается на N слоев по радиусу и



Р и с. 8. Изменение температуры блока вытеснителя по радиусу при $\varphi = \pi$ в случае касания блока трубы вытеснителя в точке $(r_0, 0)$

M слоев по углу φ . Решение плоской задачи сводится к последовательному решению двух одномерных задач по радиусу и по углу. Это так называемая аддитивная схема локально-одномерного класса, рекомендованная в работе [10]. Для аналогичного случая указанная схема проверена практикой. Для нее существует отлаженный алгоритм [11].

Результаты расчета температурного поля для рассматриваемых режимных и геометрических параметров представлены на рис. 8. Из этих данных следует, что на стороне, противоположной точке касания блока и трубы вытеснителя

(при $\varphi = \pi$), температура графита может превышать 100 °С в то время, когда средняя температура блока ниже 70 °С. Однако эта область очень узкая и может сглаживаться за счет температурной зависимости коэффициента теплопроводности. Оценка температуры графита согласуется с экспериментально определенной температурой облучения. Это свидетельствует о том, что исследованный блок вытеснителя при работе в реакторе был смещен относительно оси трубы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гончаров В.В., Бурдаков Н.С., Виргильев Ю.С. и др. Действие облучения на графит ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1978.
2. Достов А.И. Энергия Вигнера в вытеснителях СУЗ РБМК. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2001, вып. 3, с. 22—31.
3. Bridge H., Kelly B., Gray B. Stored energy and dimensional changes in reactor graphite. — In: Proc. of the Fifth Conf. on Carbon, Pennsylvania, 1962, v. 1, p. 289—316.
4. Cotrell A., Bell J., Greenought G. Theory of annealing kinetics applied to the release of stored energy from irradiated graphite in air-cooled reactors. — In: Proc. Second United Nations Intern. Conf. on the Atomic Energy, 1958, v. 7, p. 315—327.
5. Хандамиров Ю.Э. Методика оценки флюенса повреждающих нейтронов на конструктивные элементы топливной ячейки и ячейки СУЗ реактора РБМК-1000. НИКИЭТ, отчет 16.964, 2000.
6. Platonov P.A., Trofimchuk E.I., Chugunov O.K., Karpukhin V.I. Annealing of radiation damage in graphite. — Radiation Eff., 1975, v. 25, p. 105—110.
7. Нормы расчета на прочность типовых узлов и деталей из графита уран-графитовых канальных реакторов НГР-01-90.
8. Тепло- и массообмен. Теплотехнический справочник. Под ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. М.: Энергоатомиздат, 1982.
9. Schweizer D., Gurinsky D., Kaplan E., Sastre C. A Safety Assessment of the Use of Graphite in Nuclear Reactors Licensed by the USA NRC. NUREG/CR-4981, BNL-NUREG-52092.
10. Токаренко В.Ф. Разностные схемы для уравнений динамики ВВР с кипением теплоносителя. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Динамика ядерных энергетических установок, 1975, вып. 1(7), с. 75—83.
11. Антипин Г.К., Потаманова Н.П. Подпрограмма для вычисления одномерного нестационарного температурного поля в многослойных пластинах, цилиндрах, шарах. — Там же, сер. Физика и техника ядерных реакторов, 1982, вып. 3(25), с. 72—76.

Поступила в Редакцию 25.12.02

УДК 621.039.7

РАДИОТОКСИЧНОСТЬ ПРИ ЗАВЕРШАЮЩЕЙ ТРАНСМУТАЦИИ АКТИНОИДОВ, НАКОПЛЕННЫХ В ТРАНСМУТАЦИОННЫХ РЕАКТОРАХ

*Бергельсон Б.Р., Герасимов А.С., Зарицкая Т.С., Киселев Г.В.,
Мырцымова Л.А., Тихомиров Г.В. (ФГУП ГНЦ РФ — ИТЭФ)*

При обращении с радиоактивными отходами важную роль играет ядерная трансмутация. Она позволяет снизить количество опасных нуклидов и облегчить их окончательное захоронение. Основная опасность радиоактивных отходов заключена в долгоживущих актиноидах отработавшего ядерного топлива энергетических реакторов.