

скольку для соответствующих мест по толщине корпуса флюенс уменьшался от $31 \cdot 10^{18}$ до $23 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$, различие в смещении критической температуры хрупкости должно было составить не более 6%. В действительности экспериментально установленный рост охрупчивания достигал 40% (от 69 до 96 °C), что связать с различиями в химическом составе невозможно. Таким образом, результат эксперимента до сих пор оставался без должного объяснения.

Поскольку идея о влиянии на охрупчивание тепловых нейтронов не получила подтверждения, эксперименты по облучению корпусной стали в кадмии и без него оказались своевременными, чтобы обратить внимание на влияние γ -излучения. Наконец, данные об облучении образцов-свидетелей в активной зоне транспортного реактора, встреченные с недоумением и сданные на первых порах в архив, также оказались полезными при интерпретации результатов с помощью γ -излучения.

Таким образом, основным выводом работы следует считать заключение о значимости вклада реакторного γ -излучения в радиационное охрупчивание корпусной стали. Поскольку этот эффект может иметь практическое значение для совершенствования конструкции реакторов, следует считать целесообразным проведение исследований, специально направленных на изучение обсуждаемых эффектов. Для исключения недоразумений еще раз отметим, что в нашем случае влияние γ -излучения ни в коей мере не связано с макротемпературой облучаемого

материала, которая определяется условиями тепловыделения и теплоотвода.

В заключение авторы приносят благодарность своим коллегам Л.М. Лебедеву, А.Д. Амаеву за предоставление уникальных результатов облучения образцов-свидетелей и алмаза в рабочем канале транспортного реактора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mansur L., Farrell K. On the mechanisms by which a soft neutron spectrum may induce accelerated embrittlement. — J. Nucl. Mater., 1990, v. 170, p. 236—245.
2. Alexander D., Rehn L. Gamma-ray displacement damage in the pressure vessel of the advanced boiling water reactor. — Ibid., 1994, v. 209, p. 212—214.
3. Николаенко В.А., Карпукhin В.И., Гордеев В.Г. Влияние γ -излучения на кристаллические материалы при облучении в реакторе. — Атомная энергия, 1994, т. 77, вып. 3, с. 186—189.
4. Platonov P.A., Nikolaev Yu.A., Shtrombach Ya.I. Radiation embrittlement kinetics of the first generation of VVER-440 RVPs after post-irradiation annealing. — Inter. J. Pressels Piping, 2002, v. 79, p. 634—648.
5. Nikolaenko V.A., Gordeyev V.G., Karpukhin V.I. Effect of gamma-irradiation on defect annealing in diamond. — Rad. Effects Def. in Solids, 1995, v. 139, p. 173—182.
6. Albermann A., Bley G. Influence of thermal neutron on the brittleness of hightemperature gas cooled reactor liner steel. — Nucl. Technol., 1984, v. 66, p. 639—646.
7. Pravdyuk N.F., Nikolaenko V.A., Karpukhin V.I., Kuznetsov V.N. Investigation of diamond and silicon carbide as indicators of irradiation conditions. — In: Proc. Intern. Conf. Held at Berkeley Castle Gloucestershire. England, 30 May—2 June 1961, № 46, p. 57—62.

Поступила в Редакцию 12.11.07

УДК 621.039.5

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫГОРАНИЯ ОКСИДНОГО СМЕШАННОГО ТОПЛИВА С УЧЕТОМ ДВОЙНОЙ ГЕТЕРОГЕННОСТИ

Калугин М.А. (РНЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва),
Кузнецов В.И. (ВНИИНМ им. А.А. Бочвара, г. Москва)

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования выгорания оксидного смешанного топлива в ВВЭР-1000 с учетом двойной гетерогенности. Топливо состоит из двух различных материалов: обедненной урановой матрицы с малым количеством плутония и агломератов — частиц с повышенной концентрацией плутония. Важной задачей является корректный учет двойной гетерогенности, по-

зволяющий оценить отношение энерговыделения в агломератах и матрице к среднему энерговыделению по таблетке твэла. Получены численные результаты распределения выгорания, энерговыделения, а также концентрации гелия, криптона и ксенона по радиальным зонам твэла в зависимости от среднего выгорания топлива. Расчеты проводили по программе MCU-REA с модулем расчета выгорания ORIMCU [1, 2].

Постановка задачи. Эффект двойной гетерогенности имеет две составляющие — геометрическую и спектральную. Первая обусловлена локальным расположением основных делящихся изотопов в топливе в виде плутониевых агломератов, что приводит к сильной неравномерности энерговыделения в агломератах и матрице. Так, энерговыделение в агломератах может превышать среднее энерговыделение по таблетке в 4—5 раз. Этот эффект важен в термомеханических расчетах твэла. Вторая составляющая связана с различием в резонансной самоэкранировке сечений в двухкомпонентной и гомогенизированной среде. Важно отметить, что для оценки спектральной составляющей эффекта необходимо знать объемную долю агломератов в топливе, плотность и изотопный состав агломератов и матрицы, и главное, средний размер агломератов или плотность распределения их размеров.

Микроструктура смешанного топлива с плутониевыми агломератами, которое предполагается использовать в ВВЭР-1000, на сегодняшний день точно неизвестна. Поэтому в предварительных исследованиях при учете двойной гетерогенности предполагалось отсутствие спектральной составляющей эффекта. Это означает, что спектр нейтронов в двухкомпонентной и гомогенизированной среде совпадает. В этом случае нет необходимости в знании размеров агломератов и единственным параметром микроструктуры топлива, который используется в расчетах, является объемная доля агломератов в нем. Таким образом, задавшись минимальным набором характеристик топлива в качестве исходных данных, можно определить долю агломератов F_V и смоделировать выгорание смешанного топлива с плутониевыми агломератами по упрощенному алгоритму, который учитывает только геометрическую составляющую эффекта. Такое приближение позволяет использовать в расчетах стандартную аттестованную версию программы MCU-REA с немного модернизированными интерфейсами модуля выгорания.

Характеристики оксидного смешанного топлива. Такое топливо изготавливают в два этапа [3]. На первом этапе готовят смесь из диоксида обедненного урана обогащением ^{235}U 0,2% по массе с добавлением некоторого количества диоксида плутония (около 20% по массе). На втором этапе ее смешивают с диоксидом обедненного урана в пропорции, позволяющей

получить требуемое среднее содержание плутония в таблетке. В результате образуется смешанное топливо из двух или более различных материалов, различающихся содержанием плутония: матрица со случайным расположением частиц с повышенным содержанием плутония — агломератов. Матрица состоит из смеси диоксида обедненного урана и малого количества плутония — около 1% по массе.

В качестве исходных данных в настоящей работе приняты следующие характеристики топлива: $\varepsilon_T = 4,5\%$ по массе — среднее содержание плутония в таблетке, $\gamma_T = 10,3 \text{ г/см}^3$ — физическая плотность таблетки, $\varepsilon_a = 20\%$ по массе — содержание плутония в агломератах, $\varepsilon_m = 1\%$ по массе — содержание плутония в матрице, $k = 0,96$ — отношение плотностей диоксида урана и плутония, $X_5 = 0,2\%$ по массе — обогащение диоксида урана.

На основании этих данных определяли объемную долю, плотность агломератов, плотность матрицы и среднее содержание ^{235}U в таблетке по следующим формулам:

$$F_V = \frac{\varepsilon_T - \varepsilon_m}{\varepsilon_a - \varepsilon_m}; \quad \gamma_a = \gamma_T \frac{\varepsilon_a(1-k) + k}{\varepsilon_T(1-k) + k};$$

$$\gamma_m = \gamma_T \frac{\varepsilon_m(1-k) + k}{\varepsilon_T(1-k) + k};$$

$$X_T^5 = X_5 [(1 - \tilde{\varepsilon}_a)F_V + (1 - \tilde{\varepsilon}_m)(1 - F_V)],$$

где $\tilde{\varepsilon}_a$, $\tilde{\varepsilon}_m$ — массовая доля плутония в агломератах и матрице соответственно.

Моделирование выгорания смешанного топлива. На первом этапе методом Монте-Карло рассчитывали энерговыделение, потоки нейтронов и сечения изотопов для каждой радиальной зоны твэла с гомогенным составом топлива. На втором для расчета выгорания в качестве исходных данных задавали начальную концентрацию изотопов в агломератах и матрице. Выгорание на временном шаге рассчитывали отдельно в агломератах и матрице с учетом сечений, полученных на первом этапе. При этом предполагали, что микросечения изотопов в матрице и агломератах одинаковы, а потоки нейтронов и мощность перераспределяли по матрице и агломератам пропорционально объемной доле агломератов. После определения выгорания в конце временного шага вычисляли новые значения концентрации изотопов в агло-

мератах и матрице, и расчет продолжали с первого этапа. Другими словами, для расчета сечений используется гомогенная модель топлива, для расчета выгорания — гетерогенная с отдельным рассмотрением агломератов и матрицы.

Результаты расчетов. Для расчета выгорания выбрана модель бесконечной решетки твэлов ВВЭР-1000, расположенных в узлах треугольной решетки с шагом 1,275 см, средняя плотность топлива принята равной 10,3 г/см³. При такой плотности топлива объемная доля агломератов в топливе составляет 18,4%. Геометрические характеристики твэлов, изотопный состав материалов ячейки, температура и плотность теплоносителя, содержание бора в теплоносителе и средняя удельная мощность топлива взяты из работы [4]. Топливо в твэле разбивали на восемь радиальных зон. Выгорание рассчитывали с постоянной удельной мощностью топлива до среднего выгорания 60 МВт·сут/кг.

Рассчитывали выгорание, относительное энерговыделение, концентрацию He, Kr, Xe в агломератах, матрице и в среднем по таблетке. Кроме того, вычисляли коэффициенты гетерогенности выгорания, которые в данной радиальной зоне равны отношению выгорания в агломерате (матрице) к среднему выгоранию по зоне [5]. Аналогично определяли коэффициенты гетерогенности энерговыделения F_P , криптона, ксенона и гелия: F_{Kr} , F_{Xe} , F_{He} .

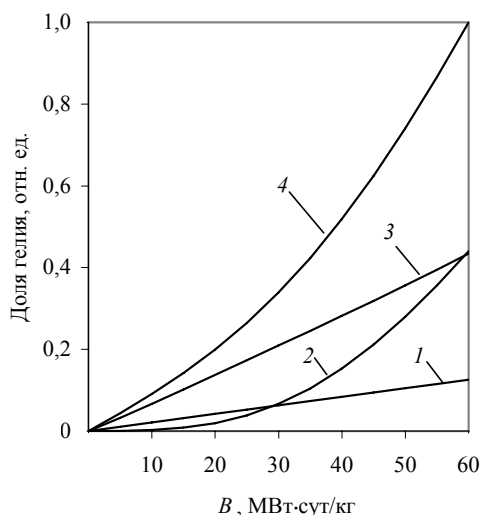
Коэффициент гетерогенности F является характеристикой эффекта двойной гетерогенности, который обусловлен наличием агломератов в топливе. Если свойства агломератов и матрицы одинаковы, то коэффициенты гетерогенности в агломератах и матрице равны единице. Чем больше коэффициент гетерогенности в агломератах, тем больше эффект двойной гетерогенности. Так, коэффициенты гетерогенности выгорания, энерговыделения, криптона и ксенона в агломератах в начале кампании достигают 4. По мере выгорания топлива свойства агломератов и матрицы сближаются, коэффициент гетерогенности в агломератах уменьшается, в матрице увеличивается. При бесконечно большом выгорании они стремятся к 1 (см. таблицу).

Зависимость коэффициента гетерогенности от среднего выгорания топлива

Выгорание, МВт·сут/кг	F_B	F_P	F_{Kr}	F_{Xe}	F_{He}
Матрица					
0,1	0,30	0,30	0,35	0,30	0,79
5	0,32	0,35	0,38	0,32	0,80
10	0,35	0,40	0,40	0,35	0,80
15	0,38	0,45	0,43	0,37	0,80
20	0,40	0,50	0,45	0,40	0,80
25	0,43	0,55	0,48	0,43	0,79
30	0,45	0,60	0,50	0,45	0,78
35	0,48	0,65	0,52	0,48	0,77
40	0,50	0,69	0,55	0,50	0,76
45	0,53	0,73	0,57	0,52	0,74
50	0,55	0,76	0,59	0,55	0,73
55	0,57	0,80	0,61	0,57	0,73
60	0,59	0,83	0,63	0,59	0,72
Агломераты					
0,1	4,11	4,11	3,88	4,12	1,94
5	3,99	3,89	3,77	4,01	1,89
10	3,88	3,65	3,66	3,89	1,87
15	3,76	3,42	3,55	3,78	1,87
20	3,65	3,20	3,43	3,66	1,89
25	3,53	2,98	3,32	3,54	1,93
30	3,42	2,77	3,22	3,43	1,98
35	3,31	2,57	3,11	3,32	2,03
40	3,21	2,38	3,01	3,21	2,09
45	3,11	2,21	2,91	3,11	2,14
50	3,01	2,05	2,82	3,01	2,18
55	2,91	1,90	2,73	2,92	2,22
60	2,82	1,77	2,64	2,82	2,24

Характер зависимости от среднего выгорания в таблетке коэффициентов F_{Kr} , F_{Xe} такой же, как и коэффициентов F_B , F_P . Иначе изменяется F_{He} . Это объясняется тем, что криптон и ксенон образуются по одному каналу — как продукты деления и поэтому их концентрация в топливе почти пропорциональна мощности или выгоранию топлива. Гелий образуется по трем каналам: как продукт деления (1), в результате α -распада трансурановых элементов (2) и в результате реакции (n, α) на кислороде (3). Поэтому его накопление (4) носит нелинейный характер (см. рисунок).

Программа MOXTAB. С использованием описанного алгоритма по программе MCU-REA с модулем ORIMCU были подготовлены константы для новой инженерной программы MOXTAB расчета распределения выгорания, энерговыделения, а также концентрации гелия,



Зависимость накопления гелия в оксидном смешанном топливе от выгорания

криптона и ксенона по радиусу твэлов с оксидным смешанным топливом ВВЭР-1000. Указанные физические характеристики рассчитываются в зависимости от обогащения, плотности топлива, среднего выгорания, числа радиальных зон в топливе, плотности теплоносителя и содержания бора в теплоносителе. Программа имеет приемлемое быстродействие и может использоваться в составе комплекса СТАРТ-3 [6], разработанного во ВНИИНМ им. А.А. Бочвара для термомеханических расчетов при обосновании работоспособности проектируемых твэлов с оксидным смешанным топливом.

Авторы считают своим долгом выразить Л.В. Майорову глубочайшую признательность за высказанные им ценные идеи и замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гомин Е.А. Статус MCU-4. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2006, вып. 1, с. 6—32.
2. Программа MCU-REA/1.0 с библиотекой констант DLC/MCUDAT-2.2. Рег. номер паспорта аттестации ПС 192 от 03.03.2005. Научно-техн. центр по ядерной и рад. безопасности Фед. службы по экол., технол. и атомному надзору. М., 2005.
3. Garcia P., Boulore A., Guerin Y. e.a. In-pile densification of MOX fuels in relation to their initial microstructure. — In: Proc. of the ANS Intern. Top. Meeting. La Grange Park IL, 2000, p. 679—693.
4. Kalugin M., Shkarovsky D., Gehin J. e.a. A VVER-1000 LEU and MOX Assembly Computational Benchmark. Specification and Results. Rep. NEA/NSC/DOC(2002)10, p. 117—126.
5. Federici E., Blanpain P., Permezel P. A model for the description of the evolution of Pu agglomerates in MOX fuels. — In: Proc. of the IAEA Meeting on Water Reactor Fuel Element Modeling at High Burnup and its Experimental Support. UK, 1994, p. 130—142.
6. Medvedev A., Bogatyr S., Kouznetsov V. e.a. Modelling of WWER fuel rod temperature condition at high burnups in START 3 code. — In: Proc. of the Third Intern. Conf. on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support. Bulgaria, 1999, p. 200—206.

Поступила в Редакцию 21.11.2008

УДК 620.179.16

АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ КОРПУСОВ ВВЭР

Васильев В.Г. (Концерн «Росэнергоатом», г. Москва),

Углов А.Л., Хлыбов А.А. (НИЦ контроля и диагностики, г. Нижний Новгород)

Корпус ВВЭР — наиболее важный элемент третьего барьера безопасности реакторной установки, ресурс которого определяет предельный срок эксплуатации АЭС с таким реактором. Нейтронное облучение и высокая температура приводят к значительному изменению микроструктуры и механических свойств материалов корпусов реакторов из низколегированной конструкционной стали (сталь 15Х2МФА, 15Х2МФАА, сварочная проволока Св-10ХМФТ) [1—3]. Снижение пластичности и сдвиг температуры перехода от вязкого разрушения к хрупкому в область эксплуатационной температуры

повышают вероятность хрупкого разрушения. Однако до сих пор нет полного понимания механизма радиационного охрупчивания, что создает трудности долгосрочного прогнозирования поведения металла и обоснования ресурса корпусов реакторов.

Влияние облучения на материалы корпуса ВВЭР-1000 и контроль за изменением их состояния при эксплуатации оцениваются с помощью образцов-свидетелей разного типа, которые размещают внутри корпусного пространства