ЖУРНАЛ «АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ», Т. 27, ВЫП. 5 (НОЯБРЬ 1969)

Конференция по облучению в быстрых реакторах

В апреле 1969 г. в Терсо (Великобритания) проходила организованная МАГАТЭ Международная конференция по облучению в быстрых реакторах. В конференции приняли участие свыше 100 делегатов от 19 стран.

На конференции были освещены основные проблемы изучения материалов для быстрых реакторов, обсуждены методики и устройства (петли, каналы, сборки, оснащенные различными мониторами, термопарами, датчиками) для радиационных исследований, рассказано о программах строительства быстрых реакторов в различных странах, а также обсуждены основные результаты облучения материалов для быстрых реакторов.

Число быстрых реакторов к 1973—1975 гг. будет удвоено, когда первые прототипы промышленных быстрых реакторов, например PFR (Великобритания), «Феникс» (Франция), БН-250 (СССР), FFTF (США) и др., будут введены в эксплуатацию.

Отмечено определенное «единообразие» в выборе типов реакторов: горючее — смеси двуокисей урана и плутония, оболочки твэлов — нержавеющие стали аустенитного класса, теплоноситель — натрий. Для вторых загрузок прорабатывается горючее из смесей карбидов урана и плутония.

Наиболее трудная и важная задача по быстрым реакторам — разработка твэлов. Конструкция твэла должна быть изучена как конструкция моста или крыла самолета, для чего создаются программы для ЭВМ, с помощью которых можно будет сделать требуемые расчеты и предсказать поведение твэлов под облучением. Но для этого необходимы точные данные о характеристиках материалов в условиях облучения быстрыми нейтронами, что, в свою очередь, требует создания оборудования, позволяющего проводить внутриреакторные измерения: а) ползучести материала оболочки и горючего, б) температуры, в) величины потока и спектра нейтронов, г) контактной проводимости и т. д.

В горячих камерах необходимо иметь возможность определить величину газовыделения, проанализировать продукты деления и их распределение. Для наиболее быстрого решения столь обширного и сложного круга вопросов предлагалось объединить усилия стран и работать по объединенным программам исследования.

С целью расширения экспериментальных возможностей рассматривалось использование тепловых реакторов для изучения радиационного повреждения материалов, предназначенных для быстрых реакторов, и, наоборот, использование облучения быстрыми нейтронами материалов для тепловых реакторов с целью резкого сокращения времени облучения с 30 до 2 лет [1].

Делается попытка установления корреляции между результатами, полученными для шести разных спектров. Приводятся результаты расчетов, согласно которым для реакторов DFR и EBR-II эффект облучения одной и той же дозой одинаков. Выбрана модель для вычисления повреждения, приходящегося на один нейтрон, и для сравнения результатов облучения в разных реакторах [2].

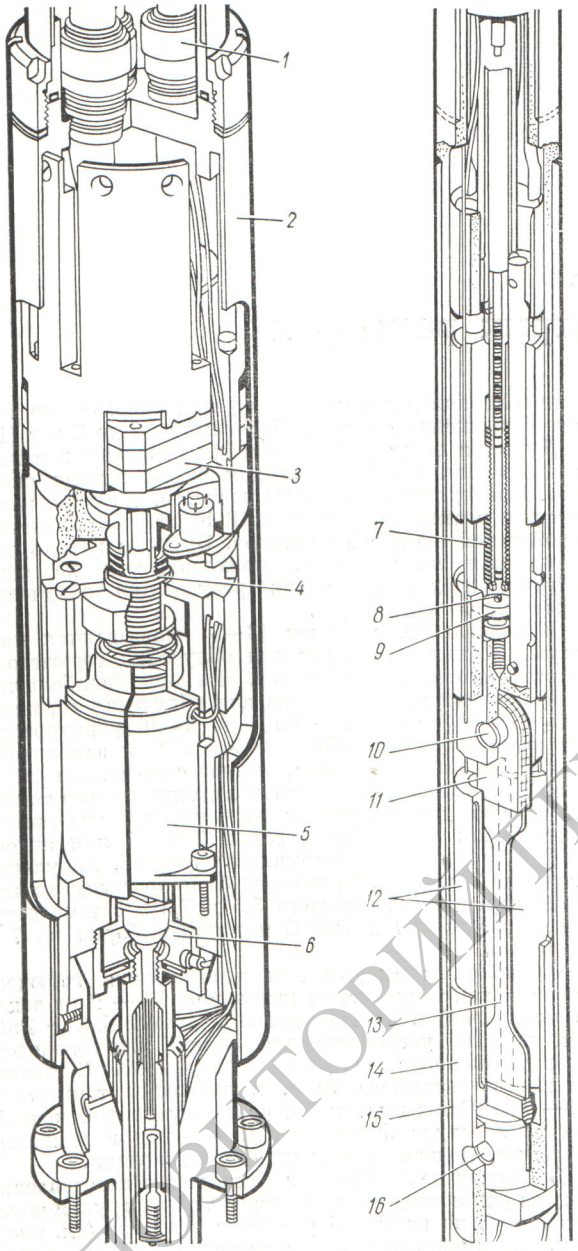
В нескольких докладах [3—9] описываются конструкции опытных сборок для облучения горючего и конструкционных материалов. Из них наибольший интерес представляют ампула для облучения горючего ($UO_2 + PuO_2$ или UC + PuC) до 5—10% выгорания при температуре на оболочке ~650° С и заполнении зазора натрием или гелием, ампула с сетчатыми фильтрами для улавливания кусочков разрушенного топлива, ампула для облучения неделящихся материалов в никелевом моноблоке в гелии (650° С) или аргоне (800° С), ампула для разрывных образцов, ампульная сборка из 77 твэлов, на которой было достигнуто выгорание двуокисного горючего 5,5 и 7,3% с температурой оболочки 600 и 700° С и миниподсборки на 7 и 19 твэлов.

Разработаны ампулы для исследования горючего с измерением температуры (термопара W — Re в чехле из молибдена) в центре столба из смеси UC + PuC. При помощи устройства для замера выделяющихся газов установлено, что до температуры 800° С газовыделение из горючего мало, в интервале температур 800—1600° С газ выделяется по диффузионной модели, при температуре более 1600° С — выход газа высок, действует модель испарение — конденсация.

В Даунри разработаны и находятся в изготовлении ампулы для исследования ползучести конструкционных материалов во время облучения в реакторе (см. рисунок). Предусмотрена автоматическая система нагружения и измерения деформации образцов, имеющих размеры 0,5 × 4,2 × 38 *см*.

Большое количество специальных каналов и ампул с замерами температуры как в центре горючего (вольфрам-рениевая термопара), так и на оболочке (хромель-алюмелевая термопара) предложили французские исследователи [10]. Эти ампулы также снабжены устройствами для непрерывного измерения мощности (до 1700 *вт/см*). Описываются ампулы для длительного облучения с отбором выделяющихся газов; другие устройства позволяют определять теплопроводность и удлинение сердечника, а также проникновение осколков в натрий из поврежденного твэла.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины



Ампула для проведения испытаний ползучести материалов: *1* — штепсельный разъем; *2* — головка сборки, состоящая из запаянного сосуда; *3* — нагружающий ступенчатый блок двигателя и коробка передач; *4* — винтовое подъемное приспособление для нагружения образца грузом; *5* — микрометрический ступенчатый двигатель; *6* — камера для измерения нагрузки; *7* — микрометрический винт; *8* — микрометрический контакт (нагружающая пружина); *9* — изолированный диск; *10* — нагружающий стержень; *11* — нагружающие диски; *12* — секционный нагреватель; *13* — образец; *14* — труба под давлением; *15* — газовый зазор; *16* — нагружающий стержень.

Интересные эксперименты по облучению в реакторе BR-2 на натриевых петлях мощностью в 200 и 500 *квт* описаны в докладах [11—14]. В первой петле изучаются окислы, карбиды и нитриды. Материал контура сталь AISI-316, температура натрия 600° С. Для отфильтрования тепловых и эпикадмиевых нейтронов применены экраны из кадмия и карбида бора. Во второй петле предполагается облучать сборки из 19 твэлов диаметром 6 *мм* при энерговыделении 600 *вт/см* (окисное горючее) и из 7 твэлов диаметром 10 *мм* с энерговыделением 1500 *вт/см* (карбидное горючее). В петле применено тройное охлаждение: натрий, двуокись углерода, вода. Скорость движения натрия 4,5 *м/сек*. Описываются конструкции сборок с натрием для реактора BR-2. В активной зоне реактора можно облучать материалы в спектре быстрых нейтронов, применяя для этого кадмиевый экран. По программе Евратома за 6 лет облучены ферритные и аустенитные стали, ванадий и его сплавы, никель, графит, бериллий, уран с покрытиями, трансурановые элементы, смеси $UO_2 + PuO_2$ и $UC + PuC$.

Достаточно внимания было уделено технике измерения температуры с помощью мониторов [8]. Установлена удовлетворительная работа мониторов в интервале температур 190—325° С. Разработан монитор из сплава Mg — Cd в оболочке из чистого железа для интервала температур 605—640° С. Нашли применение мониторы для контроля температуры по изменению твердости (мартенситные стали) или по выпадению фазы в дисперсионно-твердеющих сплавах (из нимоник RE-16).

Описанные в нескольких докладах проекты строящихся прототипов реакторов на быстрых нейтронах и предусмотренные возможности проведения на них экспериментальных исследований обобщены в таблице [15—26].

В реакторе DFR предусмотрено 36 экспериментальных пакетов, к 22 из них имеется прямой доступ, что облегчает экспериментирование. Предполагается ставить эксперименты по изучению ползучести материалов, а также по изучению твэлов при высоких выгораниях, доводя их до разрушения. Имеются экспериментальные петли [21]. В реакторе FFTF предусмотрена возможность кратковременных испытаний, а также периодического исследования твэлов без их разрушения. Имеются замкнутые петли для облучения до высоких выгораний [16, 19]. Проект материаловедческого реактора (MFR) тепловой мощностью 118 *Мвт* с потоком быстрых нейтронов $1{,}1 \cdot 10^{16}$ *нейтр/см²·сек* рассчитан на использование в качестве топлива смеси карбидов урана и плутония с оболочкой из стали 316 ($\varnothing 5 \times 0{,}25$ *мм*), температура оболочки 550° С [22].

Серия докладов была посвящена облучению материалов для быстрых реакторов. В советском докладе [27] приведены результаты определения длительной прочности при 650° С сталей Х16Н15М3Б и Х16Н15М3БР (с 0,005 все.% бора) и показано, что длительная прочность стали с бором снижается на 10% против 20% для стали без бора. Эти результаты не согласуются с данными, полученными после облучения в тепловых реакторах. Это позволяет считать, что гелиевый механизм, если он существует, не является определяющим в высокотемпературном охрупчивании сталей. Установлено, что температура отжига радиационных дефектов, полученных в результате облучения при 100° С и ответственных за упрочнение, составляет более 600° С. Это упрочнение сохраняется до 700° С и выше в зависимости от дозы облучения. Види-

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины

Основные характеристики быстрых реакторов

Реактор	Страна	Мощность, *Мвт*	Поток, *нейтр/см²·сек*	Год пуска	Горючее	Температура Na на входе, °С	Температура Na на выходе, °С	Материал оболочки	Температура оболочки (макс.), °С	Диаметр трубки, *мм*	Толщина трубки, *мм*	Литература
Rapsodie	Франция	24	$1{,}9\cdot10^{15}$	Работает	UO_2—PuO_2	410	550	AISI-316 (с Nb)	—	—	—	[26]
Rapsodie-Fortissimo	»	40	$3\cdot10^{15}$	1969—1970	UO_2—PuO_2	410	580	То же	—	—	—	[17]
Fenix	»	250	—	—	UO_2—PuO_2	—	—	Нержавеющая сталь	—	—	—	[24]
FFTF	США	400	$7{,}3\cdot10^{15}$	1973	UO_2—PuO_2	482	650	AISI-316 (с Nb) *	—	—	—	[19, 16]
DFR	Великобритания	60	$2{,}5\cdot10^{15}$	Работает	U—Mo * UO_2—PuO_2**	—	—	AISI-316 **	520	—	—	[8,1]
PFR	То же	250	$8{,}5\cdot10^{15}$	1971—1972	UO_2—PuO_2	—	—	То же	700	—	—	[21]
MFR	» »	118	$1{,}1\cdot10^{16}$	—	(U, Pu) C	150	281	» »	550	5,5	0,25	[22]
JEFR	Япония	70—100	$2{,}4\cdot10^{15}$	1973	UO_2—PuO_2	370	500	AISI-316	600	6,3	0,35	[15, 20]
KNK-II	ФРГ	—	$2{,}6\cdot10^{15}$	1972	UO_2—PuO_2 * UC—PuC **	—	—	Нержавеющая сталь	695	6,0	0,38	[18]
SNR	»	300	—	1975	UO_2—PuO_2	380	610	То же	700	8,0	0,40	
PEC	Италия	140	$2{,}8\cdot10^{15}$	—	UO_2	375	525	Нержавеющая сталь	540	5,8	0,38	[23]

* Первая загрузка.
** Вторая загрузка.

мо, радиационные дефекты в быстром реакторе вносят большой вклад в высокотемпературное охрупчивание оболочечных материалов.

Роль гелия в высокотемпературном охрупчивании рассматривается в докладах английских и шведских ученых [4, 28]. Образование гелия происходит из трех источников: B^{10}, N^{14} (при $E > 0{,}498$ *Мэв*) и Fe, Cr, Ni, Mo (при $E > 3{,}68$ *Мэв*). Авторы считают установленным тот факт, что гелий вызывает межкристаллитное разрушение, а также полагают диффузию водорода настолько большой, что его концентрация за счет (n, p)-реакции в реальном материале незначительна.

Рассматриваются [2] три температурные области охрупчивания материала: 1) ниже 350° С, где имеют место атомные перегруппировки (первая стадия образования пор), 2) 350—600° С, где происходит образование пор (иногда с формоизменением образца) и 3) выше 600° С, где возникает гелиевое охрупчивание. На первой стадии упрочнение происходит за счет точечных дефектов, предел текучести растет, однако при дозе $2 \div 3\cdot10^{22}$ *нейтр/см²* наблюдается насыщение. Отрицательное влияние гелия начинает проявляться при содержании азота $5\cdot10^{-2}$% и бора $1\cdot10^{-3}$%. В интервале 400—650° С в стали Fv-548 (легированной ниобием) наблюдается также выделение карбидов. Отмечается, что ползучесть холоднодеформированной стали 316 меньше, чем аустенизированной.

С целью сокращения времени облучения циркониевые сплавы (циркалой-2 и Zr + 2,5% Nb) для реактора SGHWR облучались в быстром реакторе DFR [1]. Испытания проводились с трубчатыми образцами, которые будут при работе находиться в потоке $\sim2\cdot10^{13}$ *нейтр/см²·сек*, т. е. за 30 лет доза составит $2\cdot10^{22}$ *нейтр/см²*. Из полученных данных следует, что разрушение труб из циркалоя-2 в реакторе SGHWR (с перегретым тяжелым паром) за период кампании маловероятно.

Довольно тревожные данные по конструкционным материалам были сообщены в докладе США [29]. Исследователи встретились с двумя проблемами: а) распуханием оболочки и б) ползучестью, приводящей к разрушению оболочки. Распухание оболочки было впервые обнаружено в конце 1967 г., оно наблюдается не только для нержавеющих сталей, но для сплавов на основе никеля, алюминия, ванадия. Механизм распухания материала оболочки еще не ясен, но предложена удовлетворительная модель: образующиеся вакансии стабилизируются гелием или другими газами, а затем вырастают в поры, в которых устанавливается парциальное давление газов. Поры, наблюдаемые в электронном микроскопе (100—1000 Å), вызывали уменьшение плотности материала в интервале температур 370—600° С. Ниже 370° С скорость диффузии вакансии мала. чтобы образовывать своеобразные «грозди» (скопления), а выше 600° С вакансии отжигаются и плотность восстанавливается. Обнаружено, что нагартованная сталь 316 распухает меньше аустенизированной. По-видимому, сетка дислокаций, образовавшаяся вследствие холодной деформации материала, способствует аннигиляции вакансий и умень-

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины

шает рост зародышевых пор. Для промышленных быстрых реакторов (типа LMFBR) предсказанное изменение диаметра оболочек твэлов при 550° С и дозе $2 \cdot 10^{23}$ *нейтр/см*^{2}, равно 8% для аустенизированной и примерно 2% для деформированной стали 316. Однако высказывается предположение, что, может быть, это явление не столь катастрофическое и распухание оболочки достигает насыщения.

Исследованию поведения горючего под облучением было посвящено несколько докладов. В докладе советских исследователей [30] приводятся конструкции твэлов с карбидным горючим второй загрузки реактора БР-5, для которых в настоящее время достигнуто выгорание более 3%, а также конструкции ампульного образца с термопарами для реактора СМ-2 и твэла с карбидным горючим для экспериментального пакета реактора БОР-60. Приводятся результаты дореакторных исследований совместимости различных карбидов (легированных хромом, с защитным покрытием и др.) с нержавеющей сталью (ОХ16Н15М3Б) и тугоплавкими материалами. Показана удовлетворительная совместимость карбидов стехиометрического состава с оболочкой через натриевый подслой. Отмечается положительное влияние на совместимость легирования карбидов урана хромом.

В докладе [31] подчеркивается необходимость получения сталей высокой чистоты и проведения испытаний ползучести сталей в условиях облучения. Уделяется особое внимание получению улучшенных смесей окисного топлива ($UO_2 + PuO_2$) путем механического смешивания, химического соосаждения или через золь-гель процесс. Исследования карбонитридов (U, Pu)CN [32, 33] направлены на изучение влияния стехиометрии и миграции плутония при выгораниях до 18%. Исследуется также нитридное топливо до выгорания 4—5% с линейной мощностью 1000 *вт/см*.

На общей дискуссии главы делегации сделали короткие сообщения по программам развития быстрых реакторов в своих странах. Указывалось, что следующее десятилетие будет отмечено бурным развитием быстрых реакторов, в связи с чем предлагалось объединить усилия исследователей, чтобы в более короткое время и с меньшей затратой средств получить необходимую информацию по поведению материалов в потоке быстрых нейтронов.

В заключение была отмечена большая польза обмена мнениями и высказано пожелание через 2—3 года собрать следующую конференцию.

Т. С. МЕНЬШИКОВА

ЛИТЕРАТУРА

1. W. Martin, J. Standring, D. Wood (UKAEA). Доклад № 7/8, представленный на Международную конференцию по облучению в быстрых реакторах. Великобритания (г. Терсо), 14—17 апреля 1969 г.
2. M. Grounes, P. Lindhagen (Sweden). (7/1). Ibid.
3. K. Bagley, J. Birss, H. Lawton (UKAEA). (1/1). Ibid.
4. J. Pounder et al. (UKAEA). (4/5). Ibid.
5. F. Barclay, J. Walford, J. Kirk (UKAEA). (2/2). Ibid.
6. R. Fordham, G. Leet, H. Sussock (UKAEA). (2/8). Ibid.
7. R. Dehn, H. Sussock, T. Horrocks (UKAEA). (7/3). Ibid.
8. J. Bramman, A. Fraser, W. Martin (UKAEA). (7/7). Ibid.
9. J. Purica, I. Grancea, V. Cuculeanu (Rumania). (7/5). Ibid.
10. Bell, Milliez, Rousseau (CEA). (4/4). Ibid.
11. M. Soenen (CEA). (2/4). Ibid.
12. G. Vanmassenhove (CEN). (2/5). Ibid.
13. P. Von der Hardt (Euraton/CEN). (4/3i). Ibid.
14. A. Lhost (Belgo-Nucleaire). (4/3ii). Ibid.
15. K. Uematsu et al. (Japan). (1/4). Ibid.
16. J. Venard, L. Kelman (USA). (1/5). Ibid.
17. Chaumont et al (CAE). (2/1). Ibid.
18. A. Plessa, K. Stohr (Siemens). (2/3). Ibid.
19. S. Arneson (USA). (8/1). Ibid.
20. K. Uematsu et al. (Japan). (8/2). Ibid.
21. G. Jackson (UKAEA). (8/4). Ibid.
22. G. Constantine et al. (UKAEA). (8/5). Ibid.
23. P. Aiello et al. (CNEN). (8/6). Ibid.
24. Rappenau, Ratier, Weisz (CEA). (1/2). Ibid.
25. G. Shewmon (USA). (2/7). Ibid.
26. Fournier, Gourdon, de Goer (CEA). (7/6). Ibid.
27. В. И. Прохоров, И. Г. Лебедев, Н. В. Красноярова (СССР). (1/6). Там же.
28. M. Grounes, L. Ljungberg (Sweden). (1/3). Ibid.
29. P. Murray (USA). (7/4). Ibid.
30. I. Golovnin et al. (USSR). (4/1). Ibid.
31. E. Evans, J. Hanson, F. Shober (USA). (4/2). Ibid.
32. G. Karsten et al. (Kernforschungszentrum, Karlsruhe). (1/7). Ibid.
33. J. Gabolde (ETJ, Karlsruhe). (1/8). Ibid.

Международный семинар по ядерной электронике

С 4 по 12 июня 1969 г. в Варне проходил Международный семинар по ядерной электронике, который был организован ОИЯИ совместно с Институтом электроники и Физическим институтом Болгарской академии наук. В работе семинара приняли участие 114 ученых и специалистов из тринадцати стран Европы и Азии.

Представленные на семинаре 65 докладов были посвящены трем основным направлениям развития ядерной электроники: временным измерениям, спектрометрическим устройствам, автоматизации измерений.

Рабочая часть семинара началась с доклада проф. Станки (Италия), посвященного будущему ядерной электроники. В докладе были высказаны некоторые соображения о применении ЦВМ и возможности изготовления слоистых полупроводниковых детекторов и высокочастотных транзисторов с помощью элионной технологии. Интерес вызвал доклад П. И. Мея (Франция), посвященный наносекундной технике. Автор сообщил о разработке ряда схем, содержащих усилители, формирователи, триггерные ячейки, генераторы, рабо-

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины