

848404825

С.Ю. Фадин, В.Н. Мурашов,  
В.В. Яковлев

ИАЭ-4133/4

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДАВЛЕНИЯ  
В ТВЭЛАХ КОНТЕЙНЕРНОГО ТИПА  
С ТОПЛИВОМ ИЗ ДВУОКИСИ УРАНА**

Москва 1985

УДК 621.039.542.342

Ключевые слова: внутритвэльное давление, ресурсные испытания, двуокись урана, газообразные продукты деления, твэлы: контейнерного типа.

Разработана методика прямого измерения давления под оболочкой твэлов в течение всего периода ресурсных испытаний. Приведены результаты исследования давления под оболочкой твэлов контейнерного типа в оболочке из циркониевого сплава  $\text{Hf}$  в течение 17000 ч до среднего выгорания 22 МВт,сут/кг  $\text{U}$ .

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших процессов, влияющим на работоспособность твэла, является образование и выход под оболочку газообразных продуктов деления (ГПД). Закономерности выхода ГПД под оболочку твэлов контейнерного типа отражаются в динамике давления газа в процессе облучения. Значение проблемы изучения газовой выделенности из ядерного топлива подтверждает большое количество аналитических и экспериментальных работ, проведенных как за рубежом, так и у нас в стране.

Однако, подавляющая часть этих работ связана с изучением механизмов газовой выделенности как таковых. Это либо до- и послереакторные структурные исследования [1 – 6], либо изучение кинетики выхода ГПД путем отжига заранее облученных образцов [7 – 9], либо внутривыделенностное изучение кинетики выхода ГПД [10 – 15]. Тем не менее конечным итогом знания механизма газовой выделенности должны быть, в первую очередь, величина давления газа, которая влияет на уровень механических напряжений в оболочке и является одним из основных параметров обоснования безопасности работы и возможных оптимизирующих изменений в конструкции твэлов.

Следует отметить, что даже точное знание параметров газовой выделенности из работающего топлива еще не означает возможности простого подсчета внутривыделенностного давления. Сложные термомеханические расчеты внутривыделенностного давления до сих пор не имеют должного экспериментального подтверждения для твэлов отечественного производства. Еще в 1967 г. Нотли в своей работе [16] отметил: "...знать газовой выделенности хорошо, а давление под оболочкой лучше". Однако до сих пор экспериментальные данные по прямому измерению давления, особенно при больших выгораниях топлива, представлены в литературе весьма ограничено [16 – 19]. Это связано с трудностями технического характера, которые удалось преодолеть в настоящей работе, представляющей экспериментальные данные по измерению давления газа в твэлах контейнерного типа в течение всего периода ресурсного испытания.

## 1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперимент по измерению давления под оболочкой твэлов в процессе их эксплуатации проводился на исследовательском реакторе МР, который оснащен рядом экспериментальных петлевых установок [20]. Параметры экспериментальных петель реактора МР позволили провести испытания ТВС с контейнерными твэлами в условиях, идентичных промышленной эксплуатации.

Сборка включала в себя шесть твэлов, два из которых были инструментированы датчиками давления.

На рис. 1 представлена схема рабочего участка исследовательской установки, на котором показано размещение датчиков давления. Датчики укреплялись на головке канала и соединялись с внутренней полостью исследуемых твэлов с помощью стальных капилляров с внутренним диаметром 0,4 мм. Капилляры находились в защитных трубках, значительно повышающих надежность системы. В концевых деталях, используемых для подсоединения капилляра к обойме датчиков, были установлены вытеснители для уменьшения "паразитного" объема.

Важнейшей отличительной особенностью представленного устройства является то, что суммарный объем капилляров и внутренней полости датчика составляет не более 10% от внутреннего свободного

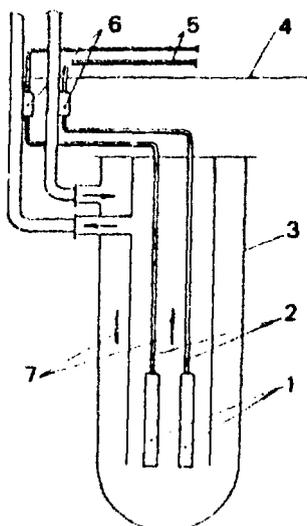


Рис. 1. Схема рабочего участка исследовательской установки: 1 — исследуемые твэлы; 2 — соединительные капилляры в охранных трубках; 3 — корпус петлевого канала типа Фильди; 4 — уровень воды в бассейне реактора; 5 — линии электрической связи датчиков в защитных трубках; 6 — датчики давления, укрепленные на подводящем трубопроводе канала; 7 — направление потока теплоносителя на рабочем участке петлевого канала

объема твэла, что как раз и обусловлено применением системы вытеснителей и малым диаметром капилляра.

Следовательно, предложенное устройство практически не искажает регистрируемое давление. При известной температуре капилляра и датчика поправка легко учитывается.

Датчики работают в условиях низкой температуры ( $50^{\circ}\text{C}$ ) и не подвержены воздействию радиационного поля реактора. Это повышает стабильность показаний датчиков и делает ресурс их работы практически неограниченным.

Для инструментирования твэлов использовались малогабаритные датчики давления промышленного изготовления типа ДД-10. Датчики индуктивные работают в диапазоне давлений 0 – 5 МПа. Электрическая часть датчика представляет собой индуктивный полумост, а принцип действия основан на деформации мембраны, которая изменяет магнитопроницаемость сердечников индуктивных катушек.

Тарировка датчиков производилась с помощью образцового грузопоршневого манометра. Она показала, что чувствительность измерительной схемы составляет 0,001 МПа, а погрешность отдельного измерения не превышает  $\pm 5\%$ .

## 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАННЫХ ТВЭЛОВ

В экспериментальной сборке использовались твэлы со средней длиной топливного столба 1003 мм. В качестве топлива применялась спеченная двуокись урана. Отношение высоты компенсационного объ-

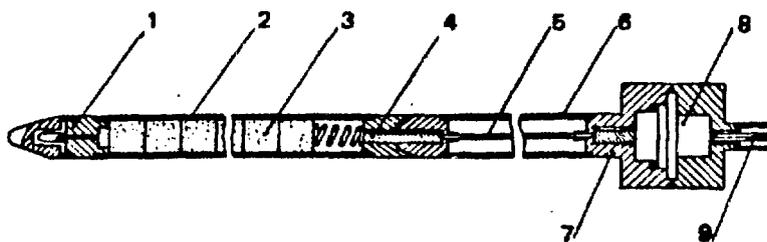


Рис. 2. Принципиальная схема инструментированного твэла: 1 – заглушка; 2 – оболочка; 3 – таблетки двуокиси урана; 4 – переходник сталь-цирконий с вытеснителем; 5 – капилляр; 6 – охранный корпус капилляра; 7 – обойма датчика с вытеснителем; 8 – датчик давления; 9 – электрические проходы в охранный корпус

Номер твэла	Исходная плотность топлива, г/см <sup>3</sup>	Исходное давление гелия под оболочкой, МПа	Высота газосборника, м. 10 <sup>-2</sup>	Величина радиального зазора между толчком и оболочкой при изготовлении, м. 10 <sup>-3</sup>	Обогащение топлива по урану-235, %	Диаметр оболочки, м. 10 <sup>-3</sup>	Толщина оболочки, м. 10 <sup>-3</sup>	Диаметр центрального отверстия в топливе, м. 10 <sup>-3</sup>
13	10,42	0,1	5,5	0,19 ± 0,01	6,5	13,65	0,95	1,4
10	10,42	0,1	5,5	0,09 ± 0,01	6,5	13,65	0,95	1,4

ема к длине топливного столба соответствовало полномасштабному твэлу. Концевые детали и оболочки твэлов, изготовленные из сплава Н-1, были также аналогичны используемым в полномасштабных сборках.

Основные параметры твэлов приводятся в таблице.

На рис. 2 схематически представлено устройство инструментированного твэла. Оболочка твэла из сплава Н-1 соединена со стальным капилляром и его охранной трубкой с помощью переходника сталь-сплав Н-1.

Твэлы были поставлены изготовителем в разобранном виде. После сборки твэлы отвакуумировали, заполнили гелием до 0,1 МПа и подвергли контролю на герметичность.

### 3. КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ОБЛУЧЕНИЯ

Температура теплоносителя измерялась с помощью штатных термомпар, установленных на входе и выходе теплоносителя из канала. Тепловая мощность сборки определялась по показаниям дифференциальной термомпары, регистрирующей подогрев теплоносителя в активной зоне. Контроль изменения мощности в переходных режимах работы реактора осуществлялся с помощью дозиметров прямой зарядки, раз-

мещенных в центральной трубке сборки на различных уровнях высоты активной зоны.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Измерение давления под оболочкой твэлов осуществлялось в течение 17 000 ч с момента начала облучения. Средняя до сборки глубина выгорания за это время достигла 22 МВт.сут/кг U. Результаты проведенного эксперимента представлены на рис. 3 — 6.

На рис. 3 изображены хронограммы давлений в исследованных твэлах, линейной тепловой нагрузки и температуры теплоносителя. Как видно из рисунка, при облучении твэлов до выгорания 22 МВт.сут/кг U при температуре теплоносителя на входе в канал 275 °С и линейной тепловой нагрузке в диапазоне 250 — 550 Вт/см, давление достигло 2,9 МПа — в твэле с радиальным зазором 0,19 мм и 3,1 МПа — в твэле с зазором 0,09 мм. В холодном режиме (сброс мощности при остановках и расхолаживании до 20 °С) величина давления во всех твэлах возросла до 1,1 МПа.

Более детальное рассмотрение динамики давления в твэлах позволяет представить несколько характерных периодов:

- выделение технологических газов в первые часы работы твэлов;
- инкубационный период;
- период интенсивного роста давления;
- снижение скорости роста давления.

На рис. 4 показаны результаты измерения давления в твэле с радиальным зазором 0,19 мм при выходе реактора на мощность в течение первых 60 ч работы. Наблюдается резкое увеличение давления до 0,70 МПа в течение первых четырех часов с последующим снижением до 0,25 МПа в течение двух суток. Прослеживаются три всплеска давления, которые соответствуют каждому последующему повышению мощности.

Если связать полученное повышение давления с выделением технологических газов, зафиксированному всплеску давления соответствует выделение 0,05 см<sup>3</sup>/г двуокиси урана сорбированного газа.

На рис. 5 представлена динамика давления в инкубационном периоде. До выгорания 0,5 МВт.сут/кг U зафиксировано уменьшение давления в твэлах с 0,25 до 0,21 МПа. При выгораниях от 0,5 до

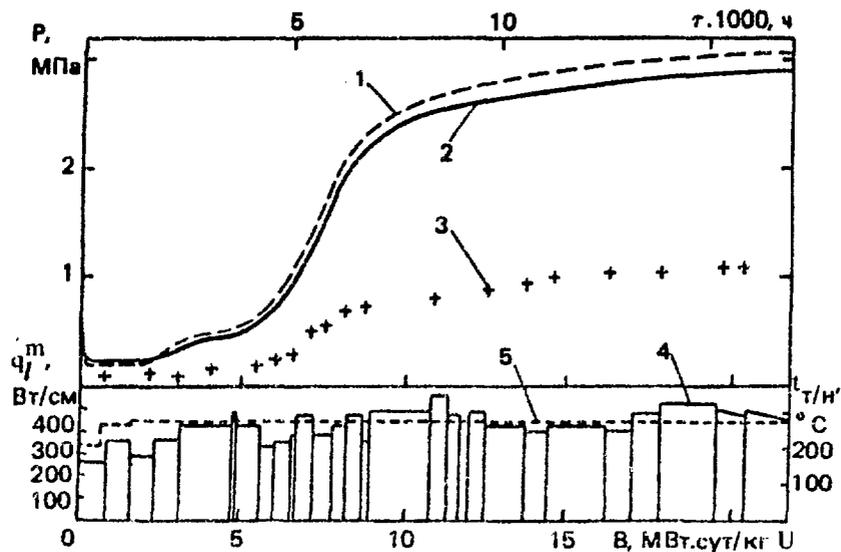


Рис. 3. Хронограммы давлений в исследованных твэлах, линейной тепловой нагрузки и температуры теплоносителя на входе: 1 — давление в твэле 10; 2 — давление в твэле 13; 3 — давление в твэлах в холодном режиме; 4 — линейная тепловая нагрузка; 5 — температура теплоносителя на входе

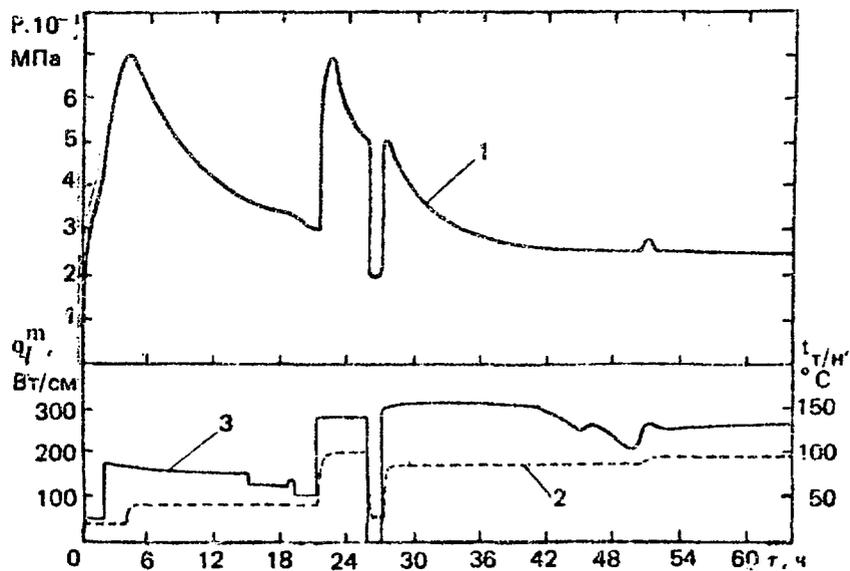


Рис. 4. Изменение давления в твэле 13, линейной тепловой нагрузки и температуры теплоносителя на входе при первом выходе реактора на мощность: 1 — давление в твэле; 2 — температура теплоносителя; 3 — линейная тепловая нагрузка

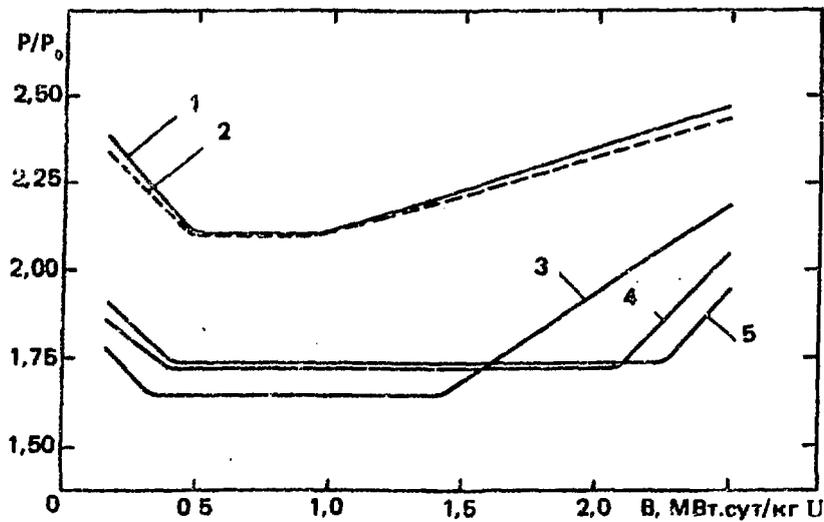


Рис. 5. Изменение давления в твэлах до выгорания 2,5 МВт.сут/кг U: 1 — твэл 13; 2 — твэл 10; 3 — твэл с  $P_0 = 0,7$  МПа [18]; 4 — твэл с  $P_0 = 2,1$  МПа [18]; 5 — твэл с  $P_0 = 3,5$  МПа [18]

1,0 МВт.сут/кг U зафиксирован участок постоянного давления в течение примерно 500 ч облучения. После этого начинается участок монотонного увеличения давления.

Анализируя динамику давления в течение всего облучения, при выгораниях от 2 до 8 МВт.сут/кг U наблюдаем период интенсивного

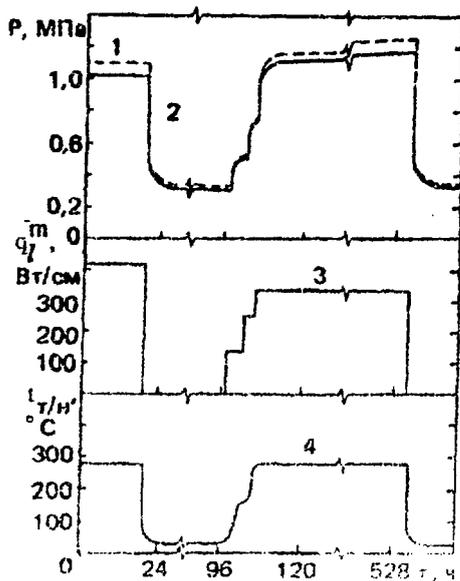


Рис. 6. Изменение давления в течение одного из типичных остановов-пусков реактора и последующего периода непрерывной работы: 1 — давление в твэле 10; 2 — давление в твэле 13; 3 — линейная тепловая нагрузка; 4 — температура теплоносителя на входе

роста давления от 0,24 до 2,00 МПа, а при выгораниях выше 8 МВт.сут/кг U — затухание скорости роста давления, которое достигает к концу облучения 2,9 и 3,1 МПа в твэлах с зазорами 0,19 и 0,09 мм соответственно (см. рис. 3).

Важной особенностью динамики газового давления, проявившей себя в эксперименте, является ступенчатый характер увеличения давления при выходе реактора на мощность после очередного останова.

На рис. 6 показан один из характерных скачков давления после останова реактора с предшествующим и последующим участками непрерывной работы. За 18 сут непрерывной работы давление повысилось на 0,36 МПа (что составило 0,002 МПа в среднем за сутки), в то время как при выходе реактора на мощность давление сразу увеличилось на 0,050 МПа по сравнению с давлением, предшествующим останову реактора.

#### 6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Зарегистрированные в эксперименте всплески давления связаны с выделением сорбированных топливом технологических газов и влаги (см. рис. 4). Этот вывод подтверждается тем, что зафиксировано давление 0,70 МПа против ожидаемого давления газа-наполнителя за счет нагрева 0,20 МПа. Это явление и его причины обсуждены в ряде работ [16, 19, 21 — 24].

На рис. 4 показано несколько пиков, которые объясняются выходом тех технологических газов, которые получили необходимую энергию активации лишь при более высоких тепловых нагрузках при каждом последующем повышении мощности.

Экспоненциальное снижение давления после каждого всплеска можно объяснить химическим взаимодействием выделившихся технологических газов и влаги с оболочкой и топливом.

В проведенном эксперименте количество выделившихся технологических газов оценивается равным 0,05 см<sup>3</sup>/г топлива при исходной плотности его 10,42 г/см<sup>3</sup>.

Количество сорбированных газов, приведенных в литературных источниках [22, 25], оценивается от 0,01 до 0,05 см<sup>3</sup>/г топлива при исходных его плотностях от 10,2 до 10,5 г/см<sup>3</sup>.

По данным работы [25] все технологические газы из объема топливных таблеток при температуре топлива 1000 °С выделяются

за 30 мин. В эксперименте наблюдалось более длительное время выделения технологических газов. Это связано со сравнительно невысокими линейными тепловыми нагрузками в первые трое суток эксплуатации. Температура топлива  $1000^{\circ}\text{C}$  и выше, необходимая для выхода всех сорбированных газов за 30 мин, реализовалась в первые часы работы лишь в 40% объема топлива.

На рис. 6 проиллюстрирована динамика давления под оболочкой твэлов в инкубационный период, а также показано сравнение результатов [18] с данной работой. На всех кривых наблюдается три характерных участка: первый — уменьшения давления, второй — постоянного давления и третий — повышения давления.

Небольшое уменьшение давления в начальной стадии инкубационного периода авторы [26, 27] объясняют процессом дроспекания топлива, т.е. увеличением его макроплотности, а следовательно, уменьшением объема по сравнению с исходным. Величина уплотнения топлива зависит от исходных структурных параметров: плотности, размера зерна, пор и их объемного распределения, а также от условий облучения.

Для участка постоянного давления в [18] получено эмпирическое выражение, связывающее его продолжительность с исходным давлением на мощности:

$$\tau = 408\sqrt{P_1}, \quad (1)$$

где  $\tau$  — продолжительность участка, ч;  $P_1$  — давление предшествующее понижению, МПа.

Расчет по формуле (1) для проведенного эксперимента составил примерно 200 ч, в то время как зафиксированный участок оказался в 2 — 3 раза длиннее. Следовательно, эмпирические соотношения, полученные для твэлов зарубежных конструкций, следует применять осмотрительно с детальным учетом параметров изготовления и облучения, для которых они получены.

Наличие инкубационного периода и первоначальный медленный рост давления можно объяснить преобладающим механизмом диффузионного выхода ГПД из зерен топлива с учетом возникновения, роста и насыщения внутризеренных пор. Модели атомарной диффузии основаны на диффузии по концентрации ГПД, растворенных в решетке двуокиси. Однако выход атомов ГПД в межзеренное про-

странство будет происходить лишь при завершении процесса роста и насыщения внутризеренных пор, когда количество попадающих туда атомов равно числу перерастворяющихся обратно в решетку. Очевидно, что пока поры растут и насыщаются, они являются основными "потребителями" ГПД по сравнению с границами зерен. Время предшествующее началу роста внутритвального давления, требуется для насыщения внутризеренных пор за счет атомов ГПД, образовавшихся за этот период в топливе [28].

С началом роста давления необходимо также связать процесс формирования взаимосвязанной межзеренной пористости, так как выход ГПД на границы зерен еще не обеспечивает их вклада во внутритвальное давление. В работе [29] показано, что соединение межзеренной пористости с поверхностью топлива наступает внезапно при достижении выгорания  $1,5 \text{ МВт.сут/кг U}$  при температуре зоны кристаллов  $1450^\circ\text{C}$ , и доля их остается постоянной или слегка увеличивается до выгорания  $3,5 \text{ МВт.сут/кг U}$ . Начало повышения давления, зафиксированное в эксперименте, соответствует данным [29].

Через 3500 ч после начала облучения при выгорании  $3 \text{ МВт.сут/кг U}$  начинается период интенсивного роста давления.

На интенсивность выхода ГПД с точки зрения атомарной диффузии оказывают влияние два основных фактора: увеличение температуры топлива и уменьшение радиуса эквивалентных сфер. К моменту начала роста давления накопилось значительное количество остановов-пусков реактора, а также значительных изменений линейной тепловой нагрузки. Такой режим работы привел к появлению большого количества радиальных и кольцевых трещин в топливе, что в сочетании со сформировавшейся системой взаимосвязанной пористости вызывает уменьшения интегральной теплопроводности и радиуса эквивалентных сфер. Вследствие уменьшения интегральной теплопроводности наблюдается повышение температуры топлива, а с уменьшением радиуса эквивалентных сфер уменьшается среднедиффузионное время жизни атомов ГПД в топливном зерне. Газовыделение становится более интенсивным, что обуславливает ускорение роста давления под оболочкой.

Следует заметить, что выделение ГПД само по себе усиливает этот процесс, так как основные их компоненты ксенон и криптон снижают теплопроводность газовой среды твэла, а следовательно, повышают температуру топлива.

Регрессионный анализ экспериментальных данных на участке от 3 до 8 МВт.сут/кг U (см. рис. 3) позволил найти количественную зависимость динамики давления от выгорания:

$$P = 4,00 - 1,45B + 0,15B^2, \quad (2)$$

где B — выгорание, МВт.сут/кг U; P — давление под оболочкой, как функция выгорания, МПа.

Снижение скорости роста давления, начавшееся в эксперименте с выгорания 8 МВт.сут/кг U, так же как и ее увеличение, можно объяснить с позиций атомарной диффузии и структурных изменений, происходящих в топливе.

Известно, что при больших выгораниях рядом исследователей зафиксированы следующие явления, происходящие в топливе: залечивание микротрещин, исчезновение внутризеренных пузырей, миграция межзеренных линзообразных пор по направлению к центру топлива, структурное сцепление материалов топлива и оболочки [30 — 32]. Эти процессы приводят к увеличению макроплотности топлива, следовательно к увеличению радиуса эквивалентных сфер, а также к глобальному массопереносу топлива от центра к оболочке. Явление массопереноса приводит к увеличению или к появлению при его отсутствии в исходном состоянии топлива центрального отверстия в топливе. В результате улучшаются теплопроводящие свойства твэла, что приводит к снижению температуры топлива и уменьшению (или полному исчезновению) центральной зоны интенсивного газовыделения.

Количественно изменение давления на участке затухания газовыделения можно описать следующим выражением:

$$P = 0,67 + 0,23B - 0,01B^2. \quad (3)$$

Рассмотрим причины ступенчатого характера динамики газового давления.

Одни авторы [33 — 36] связывают это явление с растрескиванием топлива по границам зерен, другие [21, 23] — с переформированием структуры в периоды останова-пуска реактора. В период непрерывной работы реактора при постоянных линейной тепловой нагрузке и температуре теплоносителя зафиксирован монотонный рост давления, обусловленный диффузионным выходом атомов ГПД во

взаимосвязанную межзеренную пористость, а также механизмом "выбывания" и "отдачи", характерным для низкотемпературной зоны топлива. Однако эти механизмы вызывают менее половины газы-деления. Основной выход газов и рост давления обусловлены выходом ГПД из зоны столбчатых кристаллов при переформировании структуры и растрескивании в периоды останова-пуска реактора. В период непрерывной работы большая часть ГПД, образовавшихся в зоне столбчатых кристаллов, удерживается в межзеренных каналах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика долговременной регистрации давления под оболочкой твэлов контейнерного типа, позволяющая изучить динамику давления на протяжении всего ресурсного испытания твэлов как в постоянных, так и динамических режимах работы.

✗ Давление под оболочкой исследованных твэлов за 17 000 ч облучения до среднего выгорания 22 МВт.сут/кг U повысилось с 0,2 до 3,0 МПа в горячих твэлах и с 0,1 до 1,1 МПа в холодных.

✗ Динамику давления условно можно разделить на четыре периода:

1. выделение технологических газов тремя всплесками при соответствующих повышениях мощности реактора в течение первых часов работы;

2. инкубационный период (участок стабильного давления) при выгораниях от 0,5 до 1,0 МВт.сут/кг U, обусловленный временем формирования и насыщения внутризеренных пор;

3. период интенсивного роста давления при выгораниях от 3 до 8 МВт.сут/кг U;

4. затухание скорости роста давления при выгораниях выше 8 МВт.сут/кг U.

✗ Выделение газов под оболочку носит ступенчатый характер с резким возрастанием давления при каждом пуске после останова реактора.

## Список литературы

1. Cornell R.M. An electron microscope examination of matrix fission-gas bubbles in irradiated uranium dioxide. — J. Nucl. Mater., 1971, vol. 38, № 3, p. 319 — 328.

2. Baker C. The fission bubble distribution in mixed oxide fast reactor fuel pin. — *Ibid.*: 1978, vol. 75, № 1, p. 105 — 109.
3. Ronchi C., Matzke H.J. Calculations of the in-pile behaviour of fission gas in oxide fuels. — Euratom Report EUR-4877e, 1973.
4. Hayns M.R., Wood M.H. Models of fission gas behaviour in fast reactor fuel under steady state and transient conditions. — *J. Nucl. Mater.*, 1977, vol. 67, № 2, p. 155 — 170.
5. Marlow M.O., Kaznoff A.I. Fission gas resolution mechanisms and kinetics. — *Nucl. Fuel Perf. Proc. Int. Conf. London, 1973*, 79/1 — 79/8.
6. Stahl D. Fission gas behaviour in a mild overpower transient. — *Trans. ANS*, 1973, vol. 17, p. 183.
7. Lewis W.B. et al. Fission-gas Behaviour in  $UO_2$  Fuel. — *Proc. Intern. Conf. Peaceful Uses At Energy*, vol. 11, p. 405, International Atomic Energy Agency, Geneva, 1964.
8. Ластман Б. Радиационные явления в двуокиси урана. — М.: Атомиздат, 1964.
9. Miekeley W., Felix F. Effect of stoichiometry on diffusion of xenon in  $UO_2$ . — *J. Nucl. Mater.*, 1972, vol. 42, № 3, p. 297 — 306.
10. Самсонов Б.В., Сидоров В.В. Кинетика выхода осколков деления при изменении мощности реактора: Препринт НИИАР П-27, — Мелекесс, 1968.
11. Самсонов Б.В., Фрей А.К. Исследование выхода осколков деления из керамического ядерного топлива: Препринт НИИАР П-137, Мелекесс, 1972.
12. Сулаберидзе В.Ш. и др. Исследование выхода газообразных продуктов деления под оболочку опытных твэлов с компактной двуокисью урана: Препринт НИИАР-26 (541), — Димитровград, 1982.
13. Findlay J.R. et al. The emission of fission products from uranium-plutonium dioxide during irradiation to high burn-up. — *J. Nucl. Mater.*, 1970, vol. 35, p. 24 — 34.
14. Turnbull J.A., Friskney C.A. et al. The release of radioactive gases from uranium dioxide during irradiation. — *J. Nucl. Mater.*, 1977, vol. 67, № 3, p. 301 — 306.
15. Charles M. Utilization of CONTACT experiments to improve the fission gas release knowledge in PWR fuel rods. — *Water React. Fuel Elem. Per. Comp. Mod.* — UKAEA, Vienna, 1983, p. 1.

16. Notley M.J.F. Calculation of fission-product gas pressures in operating  $UO_2$  fuel elements. — Nucl. Applic., 1967, vol. 3, p. 334 — 342.
17. Notley M.J.F. et al. Measurements of the fission product gas pressures developed in  $UO_2$  fuel elements during operation. — AECL-2662, Chalk River, Ontario, 1966.
18. Guy Lestiboudois, Chislain de Contenson. Essais d'irradiation pour etude des combustibles de reacteurs a EAU. — Seminaire Franco-Sovietique sur les reacteurs a EAU ordinaire, 18 — 24 fevrier, 1976, Sacley.
19. Burley T.B., Freshley M.D. Internal gas pressure behavior in mixed-oxide fuel rods during irradiation. — Nucl. Appl. Tech., 1970, vol. 9, p. 233 — 241.
20. Гончаров В.В. и др. Опыт эксплуатации реактора МР и проведение испытаний твэлов и материалов: Препринт ИАЭ-891. — М., 1965.
21. Самсонов Б.В. и др. Газовыделение и структурные изменения в двуокиси урана в процессе облучения. — В кн.: Сб. советских докл. на юбилейной конференции, посвященной 20-летию атомной энергии. — Обнинск: ФЭИ, 1974, т. 2, с. 64.
22. Самсонов Б.В., Сулаберидзе В.Ш. Газовыделение из окисного ядерного топлива (обзор). — Димитровград, 1977.
23. Маланченко Л.Л., Ямников В.С. Газовыделение из двуокиси урана (обзор). — АТЗР, 1971, № 6, с. 21 — 31.
24. Beyer C.E., Hann C.R. Release of indigenous gases from LWR fuel and reactor kinetics with zircaloy cladding. — BNWL-1956, Nov., 1976.
25. Banks D.A. Some observations of density and porosity changes in  $UO_2$  fuel irradiated in water-cooled reactors. — J. Nucl. Mater., 1974, vol. 54, № 1, p. 97 — 107.
26. Маланченко Л.Л., Ямников В.С. Уплотнение спеченной двуокиси урана в твэлах (обзор). — АТЗР, 1978, № 2, с. 20 — 28.
27. Chernock W.P. In-pile densification of uranium dioxide. — Trans. ANS, 1975, vol. 20, № 1, p. 215 — 219.
28. Matzke HJ. Gas release mechanisms in  $UO_2$  — a critical review. — Radiation Effects, 1980, vol. 53, p. 219 — 242.
29. Turnbull J.A., Friskney C.A. The relation between microstructure and the release of instable fission products during high tempera-

- ture irradiation of uranium dioxide. — J. Nucl. Mater., 1978, vol. 71, № 2, p. 238 — 248.
30. Craig C.N. et al. Heat transfer coefficients between fuel and cladding in oxide fuel rods. — GEAP — 5748, 1969.
  31. Хоффман Х. Образование и залечивание трещин и перераспределение пористости при облучении  $UO_2$  и  $(U + Pu)O_2$ . — АТЭР, 1976, № 4, с. 19 — 29.
  32. Wilson C.N., et al. In-reactor of materials used to control fuel — cladding chemical interaction. — HEDL-SA-1268, 1977.
  33. Notley M.J.F. A computer program to predict the performance of  $UO_2$  fuel elements irradiated to a burnup of 10000 MWd/mtU. — Nucl. Appl. Technol., 1970, vol. 9, № 2, p. 195 — 204.
  34. Ma B.M. Irradiation swelling, creep and thermal-stress analysis of fuel LWR elements, computer code ISUM-2. — Nucl. Engin. Desing, 1975, vol. 34, p. 361 — 378.
  35. Michels L.C., Poeppel R.B. Influence of grain boundaries on fission gas release in mixed-oxide fuels. — Trans. ANS, 1972, vol. 15, № 1, p. 199 — 200.
  36. Фундаментальные исследования по атомной энергии в США за 1968 г. — М.: Атомиздат, вып. 4, 1970.

**Редактор Г. Я. Кармадонова**  
**Технический редактор Н. И. Мазанова**

**Т-06624, 8.02.85. Формат 60x90/16. Уч.-изд. л. 0,9**  
**Тираж 207. Индекс 3624. Заказ 122**

**Отпечатано в ИАЗ**

## РУБРИКАТОР ПРЕПРИНТОВ ИАЗ

1. Общая, теоретическая и математическая физика
2. Ядерная физика
  
3. Общие проблемы ядерной энергетики
4. Физика и техника ядерных реакторов
5. Методы и программы расчета ядерных реакторов
  
6. Теоретическая физика плазмы
7. Экспериментальная физика плазмы и управляемый термоядерный синтез
8. Проблемы термоядерного реактора
  
9. Физика конденсированного состояния вещества
10. Физика низких температур и техническая сверхпроводимость
11. Радиационная физика твердого тела и радиационное материаловедение
  
12. Атомная и молекулярная физика
13. Химия и химическая технология
  
14. Приборы и техника эксперимента
15. Автоматизация и методы обработки экспериментальных данных
16. Вычислительная математика и техника

Индекс рубрики дается через дробь после основного номера ИАЗ.

15 коп.

Индекс 3624

Препринт ИАЭ-4133/4. М., 1985