

УДК 621.039.59

Термоцентробежный метод вскрытия ТВЭЛОВ

Дружинин Л. К., Новоселов Г. П., Борисов Г. Б., Сафронов Б. В., Садовский А. Б., Комаров Э. В.

В последние годы в связи с необходимостью регенерации отработавшего топлива быстрых реакторов значительное внимание уделялось методу термического вскрытия окисных ТВЭЛОВ путем оплавления стальной оболочки [1—4].

Однако в случае применения этого метода для переработки окисных ТВЭЛОВ с циркониевой оболочкой возникает ряд проблем, связанных с потерями топлива и необходимостью подбора материала тигля для термического вскрытия ТВЭЛОВ, что объясняется интенсивным взаимодействием расплавленного циркония с UO_2 и большинством известных материалов тигля. Скорость взаимодействия циркония с UO_2 в интервале 1573—2073 К описывается уравнением [5]

$$\lg W\tau^{-1/2} = 2,118 - 5110/T,$$

где W — количество прореагировавшей UO_2 на 1 cm^2 поверхности, г; τ — время взаимодействия, ч; T — температура, К.

При 2073 К и времени контакта циркония с UO_2 15 с расчетное содержание урана в материале оболочки ТВЭЛА ВВЭР может составлять >4%. Эти данные согласуются с экспериментальными результатами, полученными при вскрытии ТВЭЛОВ оплавлением их циркониевой оболочки.

Известны способы вскрытия ТВЭЛОВ путем сплавления циркониевой оболочки с другим металлом [3, 4], что позволяет снизить температуру процесса и тем самым уменьшить потери ядерного топлива. Однако этот путь связан с увеличением объема отходов. Одним из возможных путей уменьшения взаимодействия расплавленного циркония с UO_2 является сокращение времени контакта жидкой и твердой фаз при вскрытии ТВЭЛОВ. В связи с этим для переработки окисных ТВЭЛОВ с циркониевой оболочкой был разработан новый метод вскрытия оболочки, основанный на сочетании операций быстрого плавления оболочек ТВЭЛОВ электрической дугой и грануляции расплавленного материала под действием центробежных сил при вращении ТВЭЛА вокруг оси (рис. 1) [6].

Для осуществления процесса вскрытия отдельные ТВЭЛЫ или сборка приводятся во вращение со скоростью 500—3000 об/мин. Между торцами ТВЭЛОВ и катодом зажигается дуга постоянного тока ($U = 30 \div 40$ В, $I = 200 \div 300$ А), которая плавит материалы оболочки. Образующийся на торце сборки расплав под действием центробежных сил удаляется в окружающее пространство. При этом расплав охлаждается и кристаллизуется в виде сферических частиц. Ядерное топливо по мере вскрытия оболочки также удаляется из зоны действия дуги под действием центробежных сил в виде

целых таблеток или их осколков. Процесс термоцентробежного вскрытия осуществляется в камере с контролируемой атмосферой. Катодом может служить вольфрамовый электрод или вторая сборка ТВЭЛОВ. В последнем случае электрическая дуга оплавляет одновременно оболочки двух сборок.

На основании анализа и расчетов была выполнена серия экспериментов по опробованию и отработке процесса термоцентробежного вскрытия ТВЭЛОВ. Эксперименты проводились на установке, разработанной для получения сферических порошков металлических и керамических материалов центробежным распылением в контролируемой атмосфере [7]. Вскрытию подвергались пучки отрезков необлученных ТВЭЛОВ типа ВВЭР (по 2—4 штуки). Процесс проводили в атмосфере аргона или гелия при скорости вращения 500, 1000, 2000,

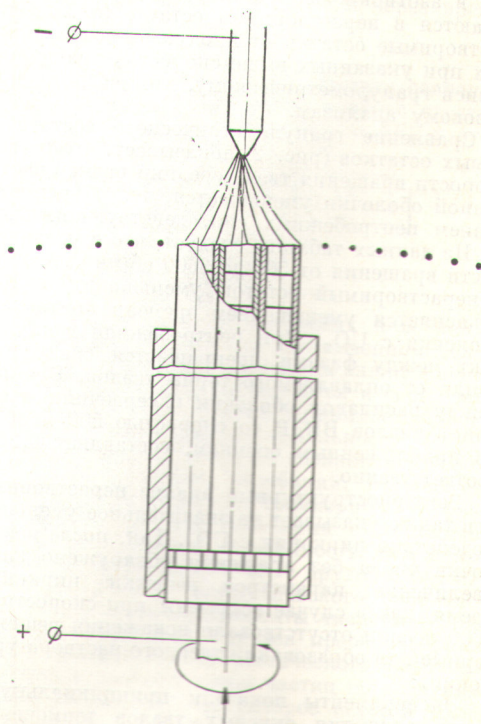


Рис. 1. Принципиальная схема процесса термоцентробежного метода вскрытия ТВЭЛОВ

Вскрытие твэлов с циркониевой оболочкой и растворение полученного продукта в азотной кислоте

Разрушение твэлов				Ситовой анализ продуктов вскрытия, мас. %				Характеристика раствора		Растворение продукта	
Скорость вращения пучка твэлов, об/мин	Время вскрытия пучка твэлов, с	Количество продуктов вскрытия, г	Количество UO ₂ , г	+5 - 10 мм	+1 - 5 мм	+0,4 - 1,6 мм	0,4 мм	Концентрация урана, г/л	Концентрация циркония, г/л	Содержание урана в нерастворимых остатках, %	Потери урана с материалом оболочки, % от исходного количества
1000	28	283,23	223,36	41,51	43,63	14,11	0,39	283,7	0,01	2,18	0,68
2000	26	288,74	224,79	29,69	51,13	18,35	0,83	276,9	0,07	0,47	0,15
3600	22	328,29	261,10	33,33	46,62	18,96	1,09	330,9	0,01	0,31	0,11

3600 об/мин и скорости оплавления 750—800 мм/мин. Начальная температура газа в аппарате 20—25 °С. В этих условиях расплывенный жидкий металл до за- твердевания пролетал 400—500 мм.

Продукты вскрытия, гранулометрический состав которых при различных размерах фракций дан в таблице, представляют собой механическую смесь гранул циркониевой оболочки и обломков брикетированного топлива, причем не было обнаружено прилипания металлических гранул к частичкам топлива, а также оплавления этих частичек. При обработке продуктов вскрытия азотной кислотой топливо полностью переходит в азотнокислый раствор, а циркониевые гранулы остаются в нерастворимом остатке (см. таблицу). Нерастворимые остатки от продуктов вскрытия, полученных при указанных выше скоростях вращения, подвергались гранулометрическому, химическому и рентгено- фазовому анализам.

Сравнение гранулометрического состава нерастворимых остатков (рис. 2) показывает, что с увеличением скорости вращения твэла средний размер частиц оплавленной оболочки уменьшается, что объясняется увеличением центробежных сил, действующих на расплав.

Из данных таблицы следует, что с увеличением скорости вращения от 500 до 3600 об/мин переход топлива в нерастворимый остаток уменьшается в 10 раз, что объясняется уменьшением времени контакта расплава оболочки с UO₂. При центробежной грануляции контакт между фазами прекращается сразу при отрыве капли от оплаваемого торца твэлов. Время контакта между расплавом оболочки и сердечником при грануляции твэлов ВВЭР со скоростью 500 и 3600 об/мин, по приближенным оценкам, составляет 0,25 и 0,05 с соответственно.

Рентгеноструктурный анализ нерастворимых остатков также указывает на значительное уменьшение взаимодействия циркония с UO₂. Так, после вскрытия оболочки твэла без вращения обнаружено значительное увеличение параметров решетки циркония, в то время как в случае вскрытия при скорости вращения 3600 об/мин отсутствовали искажения решетки, характерные для образования твердого раствора урана в цирконии.

Эксперименты показали принципиальную возможность вскрытия окисных твэлов термоцентробежным способом. Отличительные особенности процесса следующие.

1. Избирательное расплавление частей твэлов. Так, металлические части твэлов полностью расплавляются в процессе вскрытия, в то время как брикеты окисного топлива даже не оплавляются.

2. Время пребывания ядерного топлива и материала оболочки в зоне нагрева минимально, что способствует уменьшению перехода топлива в материал оболочки. Время контактирования металлического расплава с топливом сокращается до десятых долей секунды и менее.

3. В связи с малой толщиной оболочек твэлов и чехла тепловыделяющей сборки можно значительно повысить удельную мощность при воздействии электрической дуги на материал оболочки, что обуславливает

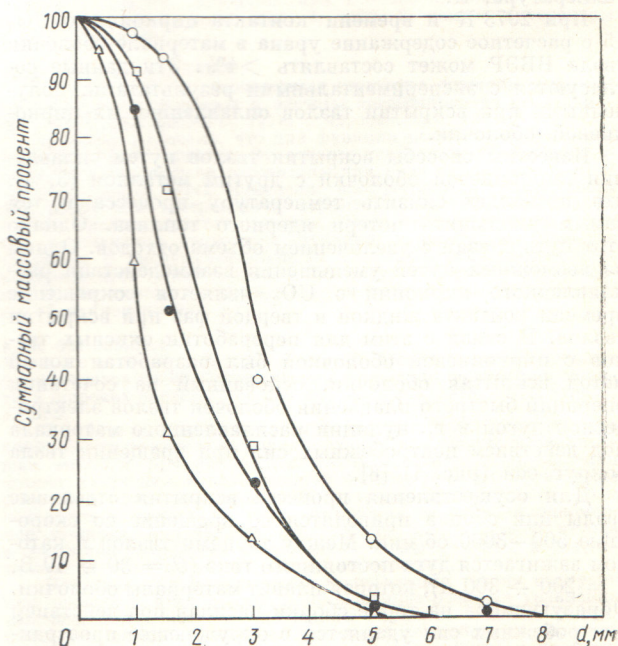


Рис. 2. Зависимость гранулометрического состава продуктов разрушения оболочки от скорости вращения твэлов 500 (O) 1000 (□), 2000 (●) и 3600 об/мин (Δ)

высокие скорости вскрытия. По предварительным оценкам, при диаметре сборки 60—80 мм и мощности электрической дуги до 100 кВт можно достичь скорости вскрытия сборок 0,1—0,5 м/мин.

4. Распыляемый материал оболочки имеет форму сферических гранул, что благоприятствует перемещению материала по транспортным коммуникациям. Сферическая форма гранул позволяет также рассматривать вопрос об отделении материала оболочки от керамического топлива механическими методами.

Новый метод вскрытия твэлов с циркониевой оболочкой позволяет резко уменьшить потери урана с оболочкой и обеспечивает высокую скорость процесса.

Поступило в Редакцию 2.VII.75

В окончательной редакции 20.IV.78

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новоселов Г. П., Агеенков А. Т. «Атомная энергия», 1969, т. 26, вып. 3, с. 230.
2. Новоселов Г. П. и др. «Атомная энергия», 1974, т. 36, вып. 1, с. 69.
3. Агеенков А. Т. и др. Авт. свид. № 357596. «Бюл. изобрет.», 1972, № 33.
4. Новоселов Г. П. и др. «Атомная энергия», 1973, т. 35, вып. 5, с. 323.
5. Weber C. «Prog. Nucl. Energy», 1959, ser. V, v. 2, p. 295.
6. Дружинин Л. К. и др. Авт. свид. № 475904. «Бюл. изобрет.», 1978, № 8.
7. Дружинин Л. К. и др. В кн.: Получение покрытий высокотемпературным распылением. М., Атомиздат, 1973, с. 71.

УДК 621.384.02

Управление энергетическим распределением пучка на плато магнитного поля протонного синхротрона ИФВЭ

гуров г. г.

Для эффективного использования ускоренного пучка в физических экспериментах и при исследовании ускорителя часто возникает необходимость в изменении энергетического распределения пучка. Для этой цели существуют различные методы: перебор фазы ускоряющего напряжения [1], адиабатическое изменение амплитуды ускоряющего поля [2] и т. д.

В настоящей работе описан простой метод управления энергетическим распределением сгруппированного пучка на плато магнитного поля протонного синхротрона, позволяющий изменять как форму распределения, так и его максимальную ширину за время порядка периода синхротронных колебаний.

Если фазовый размер сгустка намного меньше размера сепаратрисы, то форма сгустка на фазовой плоскости описывается эллипсом:

$$(\Delta E / \delta E)^2 + (\Delta \varphi / \delta \varphi)^2 = 1,$$

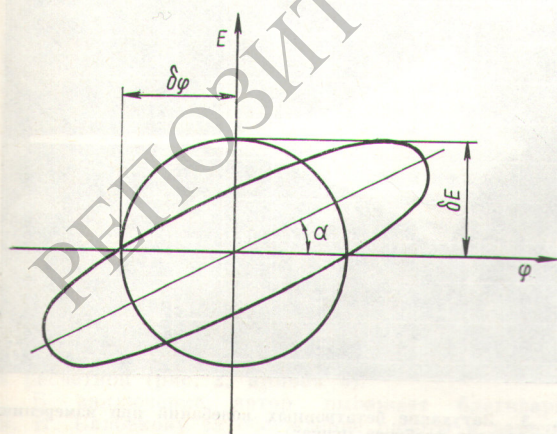


Рис. 1. Дрейф сгустка на фазовой плоскости

где δE и $\delta \varphi$ — максимальные размеры сгустка; ΔE и $\Delta \varphi$ — текущие координаты граничной точки сгустка относительно равновесной частицы.

При выключении ускоряющего поля сгусток деформируется, сохраняя форму эллипса (рис. 1). Если вновь включить ускоряющее поле в той же фазе, что и до выключения, эллипс начнет вращаться и через время

$$\Delta t_{B\varphi} = 1/2\Omega \arctg 2/\Omega \Delta t_{др}$$

примет положение, при котором оси эллипса совпадут с осями координат и энергетический разброс сгустка будет минимален. Размеры сгустка $\delta \varphi_H$ и δE_H в этот момент равны

$$\delta \varphi_H = \left[1 + \frac{\Omega^2 \Delta t_{др}^2}{2} - \sqrt{\left(1 + \frac{\Omega^2 \Delta t_{др}^2}{2} \right)^2 - 1} \right]^{-1/2} \delta \varphi,$$

$$\delta E_H = \frac{\delta E \delta \varphi}{\delta \varphi_H}.$$

Здесь Ω — частота малых синхротронных колебаний; $\Delta t_{др}$ — время дрейфа сгустка при выключенном ускоряющем поле. При дальнейшем вращении эллипса энергетический разброс сгустка увеличивается и через четверть периода фазовых колебаний принимает максимальное значение, превышающее начальное.

Проведенное выше рассмотрение сделано в предположении линейности фазовых колебаний. В действительности при размерах сгустка, соизмеримых с размером сепаратрисы, фазовые колебания существенно нелинейны. Это ограничивает возможность изменения энергетического разброса пучка, но, с другой стороны, позволяет изменять форму энергетического распределения. На рис. 2 показаны результаты численного расчета для двух характерных случаев преобразования распределения: уменьшения энергетического разброса (2) и выравнивания распределения частиц по энергиям (3). Начальный энергетический разброс сгустка (распределение 1) равен 0,3 энергетического размера сепаратрисы при $\varphi_s = 90^\circ$. Эти примеры показывают, что