

УДК 621.039.059

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ПЛАЗМЕННОЙ СЕПАРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ
К ОБРАЩЕНИЮ С ЯДЕРНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ**

*Жильцов В.А., Кулыгин В.М., Семашко Н.Н., Сковорода А.А.,
Смирнов В.П., Тимофеев А.В. (РНЦ «Курчатовский ин-т»),
Кудрявцев Е.Г., Рачков В.И. (Федеральное агентство по атомной энергии),
Орлов В.В. (НИКИЭТ им. Н.А. Доллежалея)*

Возникающие при обращении с ядерными материалами проблемы связаны с необходимостью разделения исходного материала сложного состава на группы элементов в целях получения продуктов, пригодных для последующего использования или захоронения. Обычно это достигается растворением твердого ядерного материала с последующим выделением компонентов. Радиохимические методы имеют свои несомненные достоинства и недостатки, связанные, в частности, с образованием большого количества радиоактивных отходов при переработке отработавшего топлива.

Типы ядерных материалов разнообразны. Это может быть отработавшее ядерное топливо или радиоактивные отходы. Они могут различаться также по степени выгорания, времени хранения, техническому состоянию. Способы обращения с этими материалами должны учитывать все их характеристики, быть экологически чистыми и отвечать требованиям принципа нераспространения.

Идея использования плазменного состояния вещества для создания универсального способа переработки отходов была выдвинута еще в середине XX века. Для этого предлагалось использовать термоядерный реактор [1]. В настоящее время для этих целей предлагается использовать низкотемпературную плазму. В исследованиях [2] рассматривается промышленная переработка токсичных и других отходов плазменными методами. Проведены масштабные исследования по разделению изотопов плазменными методами [3]. Технологические процессы с применением низкотемпературной плазмы разработаны и применяются в ядерном топливном цикле [4]. Плазменная технология предлагается и используется для переработки радиоактивных отходов [4, 5].

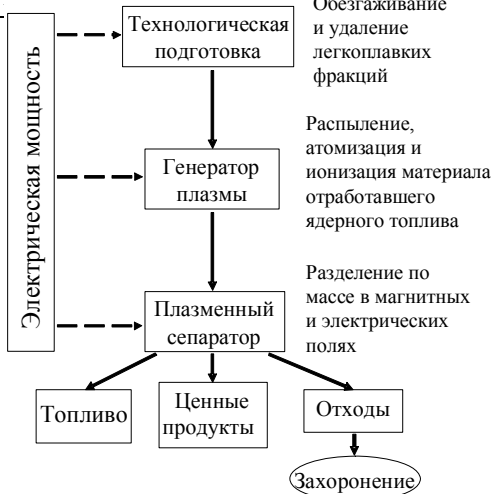
Для долгосрочной программы развития ядерной энергетики требуется создание быстрых реакторов с решением проблем топливного баланса, экономики и безопасности. Исключение изотопного разделения урана и выделения из него плутония является необходимым условием устойчивости ядерной энергетики к нераспространению ядерных материалов. Физические плазменные методы разделения без высокого разрешения по атомной массе могут в отличие от химических выполнить это условие. Переработка топлива быстрых реакторов равновесного состава должна состоять в неглубокой (~1%) его очистке от продуктов деления. Содержание актиноидов в продуктах деления не должно превышать ~0,1% [6]. Последующее фракционирование отходов проще осуществлять химически.

Плазменный сепаратор с неоднородным магнитным полем. Ядерный материал сложного элементного состава в принципе может быть разделен на группы элементов в плазменном масс-сепараторе (рис. 1). Разрабатываемая концепция предполагает преобразование ядерных материалов в поток холодной плазмы, селективный нагрев групп ионов в заданном диапазоне массы и последующее про-

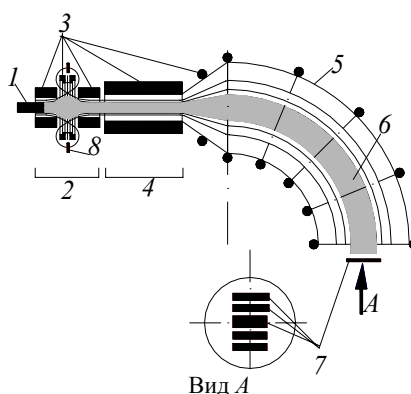
странственное выделение этих групп (сепарацию) из потока при движении в неоднородном магнитном поле. Такими группами могут быть топливо, продукты деления, ценные материалы. В плазме нет ограничений потоков по объемному заряду, что позволяет получить высокую производительность переработки. Все системы сепаратора потребляют только электроэнергию в виде постоянного тока высокочастотной и сверхвысокочастотной мощности.

В предлагаемом масс-сепараторе (рис. 2) для создания плазмы и селективного нагрева групп элементов используются резонансные явления в плазме: электронный и ионный циклотронные резонансы [7]. Низкотемпературная плазма генерируется в источнике, где зажигается электронно-циклотронный разряд в парах рабочего материала. Для уменьшения плазменных потоков на стенки в источнике плазмы выбрана диверторная конфигурация магнитного поля, применяемая в термоядерных системах [8]. Рабочий материал в источник может подаваться либо путем катодного распыления твердой заготовки 1, либо его введения в виде пара, капель или микрочастиц. Ионизованный материал формируется в плазменный поток, выходящий из источника плазмы вдоль силовых линий магнитного поля.

Поток плазмы из источника поступает в камеру, где в однородном магнитном поле происходит селективный нагрев выделяемых ионов, которые составляют малую часть плазменного потока. Нагрев осуществляется высокочастотными полями, которые вводятся в плазму с помощью расположенных вне плазменного потока антенн. В магнитном поле напряженностью B иону массой M соответствует собственная частота вращения поперек силовых линий $\omega = ZeB/M$ (ω — ионная циклотронная частота, Z — заряд иона, e — заряд электрона). Если в плазме с помощью генератора и специальных антенн возбудить колебания на этой частоте (обеспечить условия ионного циклотронного резонанса), то будут нагреваться ионы средней массой M с разбросом по массе ΔM . Требуемая селективность нагрева $\Delta M/M$ определяется в первую очередь однородностью магнитного поля $\Delta B/B$, температурой ионов, характеристиками антенн и генератора. Уменьшая однородность магнитного поля или используя генератор с широким частотным спектром, несколько монохроматических генераторов, можно селективно нагревать группы по массе элементов. Резонансный на-



Р и с. 1. Схема плазменного сепаратора для переработки отработанного топлива быстрых реакторов



Р и с. 2. Блок-схема потокового плазменного сепаратора ПС-1: 1 — отработанное ядерное топливо; 2 — источник плазмы; 3 — катушки магнитного поля; 4 — камера селективного нагрева; 5 — тороидальный сепаратор; 6 — поток плазмы; 7 — коллекторы; 8 — приемники плазмы в диверторном объеме

грев всех ионов элементов (или групп элементов) в диапазоне массы ΔM собственно и обеспечивает возможность сепарации материала в одном каскаде (цикле).

Для пространственного разделения холодной плазмы и селективно нагретых компонентов плазменных потоков был предложен тороидальный сепаратор, использующий известное явление зависимости скорости дрейфа поперек неоднородного магнитного поля от энергии иона [9]. Холодные ионы проходят через сепаратор по силовым линиям магнитного поля, селективно нагретые ионы, являющиеся малой добавкой, смещаются поперек силовых линий, выходят из потока холодной плазмы и собираются на соответствующие коллекторы.

Производительность сепаратора определяется проходящим через область селективного нагрева полным потоком ионов $J = env_s S$, где n — плотность плазмы, $v_s = (T_e/M)^{1/2}$ — скорость течения плазмы, T_e — температура электронов плазмы, S — площадь сечения плазмы. Поскольку температура электронов определена условиями получения высокой степени ионизации и отсутствием многозарядных ионов, полный поток ионов, в основном, зависит от плотности и площади. При плотности ионов плазмы выше 10^{19} м^{-3} из-за столкновений теряется селективность нагрева и не происходит пространственного разделения элементов в тороидальном сепараторе. При диаметре плазмы $\sim 1 \text{ м}$ и указанной плотности производительность одного сепаратора при непрерывной работе составляет $\sim 150 \text{ т/год}$ по урану.

Пример схемы технологического процесса переработки отработавшего ядерного топлива быстрых реакторов. Одна из возможных схем плазменной технологии переработки отработавшего топлива приведена на рис. 3. ТВС после выдержки в бассейнах поступают на механическую разделку, где их разбирают, срезают концы и снимают тонкостенную циркониевую оболочку. Далее топливо проходит стадии механического дробления и измельчения до микронных размеров. Порошок подвергается быстрому нагреву в индукционном разряде для удаления газов и легкоплавких фракций. После такой пирообработки материал размельчается до субмикронных размеров и вводится в плазменный СВЧ-источник, где происходит его атомизация и ионизация. На выходе сепаратора расположены ленточные транспортеры с установленными сменными коллекторами. По мере заполнения коллекторов они перемещаются в приемную камеру и снимаются вместе с подложками. Далее материал, осажденный на каждом коллекторе, отделяется от подложки, формуется и служит полуфабрикатом для последующей переработки, хранения или захоронения. При необходимости проводится доочистка продуктов деления.



Р и с. 3. Схема технологического процесса переработки отработавшего топлива

то малая часть перерабатываемого материала в плазменной фазе, переносимая поперек силовых линий магнитного поля, собирается на специальных приемниках в

транспортеры с установленными сменными коллекторами. По мере заполнения коллекторов они перемещаются в приемную камеру и снимаются вместе с подложками. Далее материал, осажденный на каждом коллекторе, отделяется от подложки, формуется и служит полуфабрикатом для последующей переработки, хранения или захоронения. При необходимости проводится доочистка продуктов деления.

Поскольку в источнике плазмы применена магнитная конфигурация с дивертором,

диверторной камере, а не попадает на стенки источника и камеры селективного нагрева. Периодически материал с приемников снимается и вновь подается на переработку.

Малая доля топлива ($\leq 0,1\%$) может попадать на стенки из-за перезарядки. Для его удаления рассматриваются следующие процедуры: периодическая механическая чистка поверхностей, модульная конструкция стенок с периодическим удалением их частей для переработки, очистка стенок газовым разрядом. В источнике плазмы применяются первые две процедуры, в других объемах — две последние.

Оценка энергетической эффективности плазменной переработки отработавшего ядерного топлива. В рассматриваемом сепараторе требуются затраты энергии на перевод всего материала в поток холодной плазмы и селективный нагрев малой доли этого потока. Приведем оценку энергозатрат для перевода 1 кг урана в плазменное состояние. В 1 кг урана содержится $2,5 \cdot 10^{24}$ атомов. Энергетическая цена иона (количество энергии, требуемое для перевода урана в плазменное состояние, в расчете на один ион) при требуемых параметрах плазмы ~ 500 эВ, поэтому затраты на создание плазмы составят 56 кВт·ч. Энергия, которая идет на нагрев выделяемых групп ионов, примерно такая же. С учетом к.п.д. генераторов плазмы (0,3—0,6) суммарные энергозатраты сравнимы с затратами на другие известные методы переработки.

Оценим энергетическую эффективность непрерывной переработки отработавшего топлива реактора тепловой мощностью $P_T = 3000$ МВт, коэффициентом использования установленной мощности $k = 0,8$ и средним выгоранием $B = 40$ ГВт·сут/т. Годовая потребность в ядерном топливе составляет $365 P_T k / B \approx 21,9$ т. При этом в реакторе делятся ≈ 920 кг урана и плутония (200 МэВ на акт деления). Поток 100 А ионов урана соответствует переработке в сепараторе $\approx 7,2$ т топлива в год, поэтому для переработки всего топлива реактора в течение года требуется средний ток $I \approx 300$ А. При затратах на один ион $E_i \approx 1$ кэВ (ионизация и нагрев) средняя мощность, идущая на образование плазмы, $P_{\Pi} = I E_i$ составит 0,3 МВт. Примем к.п.д. генераторов плазмы равным 0,5, тогда полная потребляемая плазмой мощность равна 0,6 МВт. При электрической мощности реактора 1 ГВт это составит 0,06% P_T , что меньше расходов реактора на собственные нужды.

Экология и безопасность. Основными достоинствами предлагаемой к разработке плазменной технологии переработки ядерных материалов являются:

- сухая переработка и фракционирование компонентов, кондиционирование продуктов деления в безводной форме;

- потребление только электроэнергии в той или иной форме без ввода дополнительных реагентов;

- высокая чистота фракций при переработке в одном цикле;

- отсутствие дополнительных (вторичных) отходов;

- универсальность — технология не зависит от материала;

- возможность очистки материалов, т.е. удаления групп элементов с малым содержанием.

Укажем факторы, влияющие на экономические и экологические показатели:

- рабочее тело находится в твердом состоянии, поэтому хранение отвалов, транспортировка сырья и продукта становятся в сотни раз менее объемными;

- размеры производства (территория и здания) уменьшаются;

конечный продукт можно переводить в нужную форму; циркуляция сепарируемых материалов происходит внутри замкнутых вакуумных объемов, что уменьшает возможность их неконтролируемых потерь.

Перечисленные достоинства и факторы рассматриваемой технологии улучшают экологические характеристики производства и делают его менее опасным при аварийных ситуациях и более устойчивым к попыткам террористических актов. Отметим, в частности, что в предлагаемом плазменном сепараторе разделяются группы элементов или элементов с достаточно большой разностью массы и поэтому невозможно разделение, к примеру, урана и плутония. Таким образом, включение плазменной технологии в переработку отработавшего ядерного топлива и отходов может привести к их качественным изменениям. Это в значительной мере определяется универсальностью переработки, позволяющей при вводе только электромагнитной мощности перевести любой материал в плазменную фазу, из которой в одном каскаде извлекаются требуемые элементы или группы элементов.

Главные физические явления и процессы, на основе которых предлагается развить плазменную технологию обращения с ядерными материалами, теоретически обоснованы и принципиально проверены в экспериментах. Однако для получения количественных данных, подтверждающих возможность практической реализации, требуется проведение большого объема технологических разработок. Задача предстоящего первого этапа работ — подтверждение принципов, положенных в основу предложенного метода. Для проверки его основных положений сооружается установка ПС-1, рассчитанная на эксперименты с имитаторами ядерных материалов [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Eastlund B., Gough W. Thermonuclear plasma as a universal solvent and industrial processor. — Bull. Am. Phys. Soc., 1968, Ser. II, v. 13, № 11, p. 1564.
2. Rutberg Ph. Some plasma environmental technologies developed in Russia. — Plasma Source Sci. Technol., 2002, v. 11, p. A159—A165.
3. Изотопы. Монография под ред. В.Ю. Баранова. М.: ИздАт, 2000.
4. Туманов Ю.Н. Плазменные и высокочастотные процессы получения и обработки материалов в ядерном топливном цикле: настоящее и будущее. М.: Физматлит, 2003.
5. Freeman R., Agnew S., Anderegg F. e.a. Archimedes plasma mass filter. — In: AIP Conf. Proc., 2003, v. 694, p. 403—410.
6. Орлов В.В., Лопаткин А.В., Глазов А.Г. и др. Топливный цикл реакторов БРЕСТ. Решение проблем РАО и нераспространения. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС, 2004, вып. 4, с. 232—237.
7. Тимофеев А.В. Резонансные явления в колебаниях плазмы. М.: Физматлит, 2000.
8. Мирнов С.В. Физические процессы в плазме токамака. М.: Энергоатомиздат, 1983.
9. Тимофеев А.В. О разделении ионов многокомпонентной плазмы в криволинейном магнитном поле. — Физика плазмы, 2000, т. 26, вып. 7, с. 667—668.
10. Смирнов В.П., Жильцов В.А., Морозов А.И. и др. Плазменная сепарация ОЯТ и РАО. — В сб.: IX Всерос. (межд.) конф. «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул». Звенигород, 4—8 окт., 2004, с. 7—11.

Поступила в Редакцию 6.03.06

УДК 539.17

ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЙ РЕАКЦИЙ $^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$ И $^{14}\text{N}(n, t)^{12}\text{C}$ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИИ НЕЙТРОНОВ 5,45—7,2 МэВ

Хрячков В.А., Кузьминов Б.Д., Дунаев М.В., Дунаева И.В., Семенова Н.Н.,