

УДК 66.061.5

Критерии выбора экстрактора*

КАРПАЧЕВА С. М.

Выбор оптимальной конструкции экстрактора длительное время является предметом дискуссии. Использовать для этой цели существующие таблицы Пратта и другие, появившиеся впоследствии, практически невозможно, так как они не учитывают специфических особенностей экстракционных систем, требующих индивидуального подхода к выбору аппарата. Например, при высокой стоимости и пожароопасности экстрагента некоторые преимущества получают центробежные экстракторы, однако высокая стоимость, сложность обслуживания делают их невыгодными для других процессов. Если в процессе экстракции необходим контакт (на одной ступени) длительностью более 1 мин, центробежные экстракторы малоприспособлены или требуют конструктивных изменений. Для экстракции неосветленных сред нельзя применять ситчатые колонны без тщательной предварительной фильтрации и т. п.

Сложность выбора экстракторов, предназначенных для регенерации отработавшего ядерного топлива, усугубляется спецификой данной технологии — необходимостью работы в дистанционных условиях, сложностью ремонта, экономические показатели которого весьма существенны, желательностью максимальной автоматизации. При регенерации отработавшего топлива добавляется еще условие соблюдения ядерной безопасности за счет ограничения объема или размеров аппарата.

Из сказанного ранее следует, что универсального экстрактора, конструкция которого оптимальна для любого процесса, быть не может. Выбор экстрактора должен проводиться с учетом особенностей реального технологического процесса, как это предусмотрено в двух предлагаемых для обсуждения таблицах. Выбор типа экстрактора для процессов регенерации отработавшего ядерного топлива приведен в табл. 1, а для экстракторов, работающих в условиях прямого обслуживания (в том числе и уранового производства), — в табл. 2. В каждом из трех разделов проводится своя оценка и дается среднеарифметическое определение качества сравниваемых экстракторов**.

При регенерации отработавшего ядерного топлива (см. табл. 1) экономическая эффективность —

* В статье высказано одно из мнений о возможных критериях и их значимости для выбора оборудования. Эти предложения нуждаются в обсуждении. Статья публикуется в порядке дискуссии.

** Все предлагаемые баллы нуждаются в дальнейшем уточнении.

менее важным фактором, чем надежность и технологическая характеристика, поэтому максимальный балл раздела 4. Чрезвычайно важен вопрос о надежности (максимальный балл 5), так как оптимальная конструкция экстрактора для дистанционных условий должна обеспечивать безостановочную и безаварийную работу в течение 5—10 лет. Любой ремонт и даже осмотры загрязненного активностью аппарата требуют специальной подготовки (отмывки и дезактивации), в результате чего возникает довольно длительный простой оборудования. Поэтому наиболее пригодным для эксплуатации является экстрактор, не имеющий в рабочей зоне и внутри корпуса механизмов, требующих наблюдения и ремонта (замены деталей). Механизмы, которые могут быть осмотрены и при необходимости отремонтированы без остановки и отмывки экстрактора, имеют значительные преимущества перед другими. Наиболее надежны экстракторы без механических устройств, однако их эффективность низка. Надежность аппарата не только отражается на технологических и экономических показателях процесса, но и улучшает условия труда обслуживающего персонала.

Технологические качества аппарата также определяют возможность организации его бесперебойной работы: экстрактор должен быть максимально «неприхотлив», т. е. быть малочувствительным к загрязнениям, легко и самостоятельно очищаться от межфазных пленок и не требовать особенно тщательной подготовки (фильтрации) растворов. Если наличие твердых частиц в растворе или образование межфазных пленок требуют останова экстрактора для очистки, то его технологическая надежность падает, уменьшается рабочий пробег и резко усложняется обслуживание. Необходимость предварительной фильтрации — отрицательный фактор, снижающий пригодность аппарата, так как это наименее автоматизированный процесс, а в дистанционных условиях он еще более усложнен, что приводит к дополнительным простоям.

Для процесса экстракции важным условием является наиболее полное разделение фаз: захват экстрагентом водной радиоактивной фазы снижает коэффициент очистки при экстракции, а унос экстрагента с рафинатом усложняет переработку последнего. При реэкстракции коэффициент очистки снижается вследствие уноса с водным реактратом органической фазы.

В процессах, требующих соблюдения условий ядерной безопасности, большую роль играет способность аппарата пропустить требуемый поток реагентов в одной цепочке (а не в нескольких).

Оценка экстракторов для регенерации отработавшего ядерного топлива

№ п.п.	Характеристика	Оценка						
		0	1	2	3	4	5	
А. Надежность аппарата								
1	Наличие движущихся частей внутри аппарата	1 механизм на 1 ступень		1 механизм на 5—6 ступеней				
2	Механизм вне аппарата			В рабочей зоне				
3	Длительность межремонтного пробега, тыс. ч		3	5	8	В ремонтной зоне 10	Прямое обслуживание 20	
4	Необходимость систематического осмотра и мелкого ремонта		3 ч в неделю			До 10 ч в месяц	3—4 сут в год	
5	Сложность ремонта и длительность простоя на ремонте		1 мес в год	До 1 мес в год			До 1 нед в год	
6	Время, затрачиваемое на замену дефектного аппарата					1 сут	Несколько часов	
Б. Технологические качества								
1	Возможность работы с неосветленным раствором	Нет	—	Частично		—	Да	
2	Способность самоочищения от осадков и межфазных пленок (при необходимости остановки для очистки оценка аппарата по п.4 раздела А)		Нет		Частично		Да	
3	Допустимые отклонения от номинальной производительности (без ухудшения технологических показателей), %					±30	±40	±50
4	Время пребывания фаз в аппарате (в % от необходимого по кинетике)		500	400	300	200	100	
5	Взаимный унос фаз при заданной производительности, %		1		0,1	0,05	0,01	
6	Возможность обеспечения промышленной производительности одной цепочкой (при сохранении ядерной безопасности)		—	Нет	—	—	Да	
7	Количество растворов, необходимых для дезактивации аппарата перед его ремонтом (в % от производительности в час)					500	200	
8	Длительность выхода на стационарный режим, ч		24		12	6	2—3	
В. Экономическая характеристика *								
1	Стоимость экстрактора на единицу продукта (с учетом запаса на простой)							
2	Общая длительность рабочего пробега (с учетом замены аппаратов, выходящих из строя ранее 10 лет), год		1	5	8	10		

№ п.п.	Характеристика	Оценка					
		0	1	2	3	4	5
3	Стоимость загрузки экстрагента на единицу продукта						
4	Стоимость противопожарных мероприятий, связанных с качеством и объемом экстрагента на единицу продукта					10	
5	Стоимость КИП и автоматики от стоимости экстрактора, %		50				
6	Энергозатраты на единицу продукта						
7	Объем единицы оборудования на единицу продукта **						
8	Площадь помещения, м ² на единицу продукта **						
9	Объем помещения, м ³ на единицу продукта **						
10	Количество эксплуатационного и ремонтного персонала на цепочку, чел./смену		12	8	6		3
11	Возможность моделирования эффективности и производительности от лабораторной модели до величины в м ³ /ч		1	3	5		< 5

* Для составления оценки в баллах по пп. 4, 3, 4, 6—9 принимается следующая шкала: 4—стоимость по проекту (или реальная) наиболее дешевого типа экстрактора; 1—наиболее дорогого.

** С учетом механизмов в рабочей зоне, расстояния между ступенями, запаса производительности или установки дополнительных аппаратов на время простоя.

Это специфическое требование, выполнение которого снижает капитальные затраты и упрощает обслуживание, учтено в п. 6 разд. А (см. табл. 1) и может быть обеспечено конструкцией аппарата.

В разд. В помимо обычных затрат на оборудование, здание, энергопотребление и т. п. в скрытом виде отражены надежность и технологические качества экстракторов, так как при необходимости остановок объем или количество оборудования, а также помещения должны быть соответственно увеличены. Параметр надежности отражен также и в п. 10. Затраты по п. 4 в значительной мере зависят от правильно выбранного типа экстрагента и от объема экстрактора. Возможность моделирования экстрактора на заданную производительность (п. 11), хотя и является технологической характеристикой аппарата, определяет затраты на предварительные исследования и поэтому помещена в разд. В.

Анализируя имеющиеся сведения [1, 2] об эксплуатационной характеристике трех наиболее известных типов экстракторов: центробежных,

смесителей-отстойников и пульсационных колонн, приходим к выводу о преимуществе последних. Действительно, пульсационные колонны не имеют движущихся частей в рабочей зоне, требуют мало времени для осмотра и ремонта (длительность межремонтного пробега $>10^4$ ч), поэтому их надежность можно оценить по всем пунктам высшим баллом 5. Этим же баллом оцениваются и их технологические качества. Колонны самоочищаются от межфазных пленок, могут работать с неосветленными растворами (особенно колонны с насадками КРИМЗ) без предварительной фильтрации, в то время как центробежные экстракторы и смесители-отстойники требуют специальной подготовки растворов и во многих случаях — остановок для промывки.

По экономическим показателям пульсационные колонны несомненно выше, чем смесители-отстойники. Вопрос об их экономическом преимуществе перед центробежными экстракторами по-разному рассматривается в США и во Франции [1, 2]. Так, американские специалисты показали, что

колонны для установки, перерабатывающей до 3 т/сут отработавшего ядерного топлива, экономичнее, чем центробежные экстракторы. Во Франции пришли к выводу, что для производительности 5 т/сут нужны две цепочки колонн или одна цепочка центробежных экстракторов; при таком условии завод, применяющий современные аппараты, обходится дешевле. Однако в последнее время появились колонны специальной конфигурации для высокопроизводительных ядерно-безопасных процессов. Поэтому для производительности 5 т/сут отпадает необходимость в двух цепочках колонн и, следовательно, изменяется стоимость завода. Представители фирмы SOGEMA на состоявшемся в ноябре 1978 г. советско-французском семинаре высказали мнение, что пульсационные колонны оптимальны для регенерации ядерного топлива.

Сравнение экстракторов, предназначенных для обычных условий (допускающих прямое обслуживание), приведено в табл. 2. В этом случае роль экономического фактора важна не менее, чем роль надежности и технологической характеристики. Поэтому конкурентоспособными для некоторых условий, в частности для экстракционных установок, расположенных на открытом воздухе, становятся гравитационные колонны (прежде всего ситчатые). Эти установки надежны, так как вообще не имеют механизмов, но ВЭТС их велико и возрастает по мере увеличения сечения, т. е.

производительности. Такая колонна может обеспечить производительность 15—20 м³/ч при числе теоретических ступеней до 5 (высота при этом составит ~20 м).

Хотя наиболее надежными являются аппараты без механизмов, возможность непосредственного обслуживания позволяет оценивать аппараты, имеющие внутри движущиеся части, выше, чем в табл. 1. Требования, по которым оцениваются экстракторы в табл. 2, менее жестки, чем при рассмотрении дистанционно работающих аппаратов. В этом случае требуется меньшая длительность межремонтного пробега, а сложность и длительность ремонта, как и необходимость систематического осмотра, меньше сказываются на оценке аппарата.

Аналогично смягчены и требования к технологическим параметрам экстрактора. Например, аппараты, нуждающиеся для стабильной работы в предварительной (даже тонкой) фильтрации, считаются пригодными для процесса (3 балла), как и экстракторы, нуждающиеся в остановках для очистки от межфазных пленок и осадков, и даже максимальная величина взаимного уноса в этом случае значительно выше, чем в табл. 1, поскольку необходимая степень очистки в этом случае обычно меньше. При выборе типа экстрактора по табл. 2 определяющим оказываются технологические требования реального процесса. При

Оценка экстракторов, работающих в условиях непосредственного обслуживания

Таблица 2

Характеристика	Оценка				
	1	2	3	4	5
А. Надежность аппарата					
Наличие движущихся частей		Внутри аппарата 1 механизм на 1 ступень	На 6 ступеней	Вне аппарата	Без механизма
Длительность межремонтного пробега, тыс. ч		3	5	8	10
Необходимость систематического осмотра и мелкого ремонта		3 ч в неделю			
Сложность ремонта и длительность простоя	< 5 сут в месяц	< 3 сут в месяц	< 2 сут в месяц	< До 1 мес в год	До 3 сут в месяц < До 2 нед в год
Б. Технологическая характеристика					
Возможность работы с неосветленным раствором			Нет	Частично	Да
Допустимые отклонения от номинальной производительности (без ухудшения технологических показателей), %			±30	±40	±50
Способность самоочищения от осадков и межфазных пленок			Нет	Частично	Да
Взаимный унос фаз, отн. %		1	0,5	0,2	0,1
В. Экономическая характеристика (см. табл. 1, разд. В)					

малом числе ступеней и невысокой производительности наиболее экономичными могут оказаться смесители-отстойники, центробежные экстракторы более пригодны для сравнительно высокой нагрузки и небольшого числа ступеней, колонны обеспечивают большое (практически любое) число ступеней.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. In: Proc. Intern. Solv. Extr. Conf. Lion, 8-14 Sept. 1974, v. 3, p. 2063.
2. Costello I., Levins D. «Ann. Nucl. Energy», 1976, v. 3, N 2-3, p. 73.

Поступила в Редакцию 01.09.78

УДК 538.121.8

Взаимодействие сильноточного релятивистского электронного пучка с веществом

ДИДЕНКО А. Н., ЧИСТЯКОВ С. А., ЯЛОВЕЦ А. П.

Опубликованные в настоящее время экспериментальные данные по взаимодействию сильноточных электронных пучков (СЭП) с веществом свидетельствуют о различии в некоторых случаях поведения в веществе СЭП и обычных (неинтенсивных) пучков. Так, в работе [1] указывается на аномально большое поглощение энергии в тонкой золотой фольге при облучении ее мощным потоком релятивистских электронов, а в работе [2] отмечается уменьшение глубины проникновения электронов в вещество при падении на него СЭП.

Очевидно, что для понимания полученных экспериментальных результатов, а также в целях практического использования СЭП необходимы соответствующие теоретические исследования. Вследствие сложности задачи о взаимодействии СЭП с веществом ее решение в полном объеме пока не представляется возможным. Более простой является задача о нахождении потока быстрых электронов в веществе при падении на него СЭП. Решение этой задачи позволит найти основные закономерности поведения СЭП в веществе. Именно этот подход и реализуется в настоящей работе.

Система уравнений и ее решение. Запишем систему уравнений, описывающую прохождение СЭП через слой вещества с координатами поверхностей z_0 и z_1 . Малое время диссипации энергии быстрого электрона в конденсированной среде ($\tau_e \approx 10^{-12} \div 10^{-11}$ с) позволяет записать стационарные уравнения, так как τ_e много меньше времени, характеризующего изменение параметров падающего на вещество пучка (изменение тока и энергии СЭП происходит за единицы — десятки наносекунд). Кроме того, малое τ_e позволяет также пренебречь изменением состояния вещества, связанного с действием на него СЭП. Отсюда следует, что в целом нестационарная задача о прохождении СЭП через вещество может быть решена последовательным решением стационарных задач на малых промежутках времени. Рассматривается случай одномерной геометрии,

что справедливо для пучков, поперечные размеры которых превышают пробег электронов в веществе.

При прохождении СЭП через вещество релятивистские электроны, помимо упругих и неупругих столкновений с атомами вещества, взаимодействуют с электрическим полем E , которое в общем случае создается объемным зарядом самого пучка, электронами и ионами, образующимися в результате ионизации среды, и термализованными электронами. В стационарном случае объемный заряд пучка нейтрализуется за время $\sim \sigma^{-1}$, где σ — проводимость среды, а объемный заряд, создаваемый электрон-ионными парами, можно положить равным нулю, так как вторичные электроны рождаются главным образом с малой энергией и термализуются вблизи места своего рождения. Поэтому в проводящей среде электрическое поле создается объемным зарядом, который образуется вследствие термализации быстрых электронов и является источником тока проводимости.

Полагая, что в этом случае проводимость среды такова, что рассасывание объемного заряда происходит главным образом за счет тока проводимости, из уравнения непрерывности для заряда можно получить уравнение для поля, которое в одномерной геометрии имеет вид

$$d(\sigma E)/dz = eN(z), \quad (1)$$

где e — заряд электрона; $N(z)$ — скорость термализации быстрых электронов в плоскости z .

Так как в рассматриваемой геометрии поле имеет одну компоненту $E \{0, 0, E(z)\}$, то кинетическое уравнение для дифференциального потока $\Psi(z, u, T)$ имеет вид [3]

$$\hat{L}\Psi + E\hat{F}\Psi = S(u, T)\delta(z - z_0), \quad (2)$$

где \hat{L} — оператор переноса, учитывающий процессы упругих и неупругих рассеяний; $\hat{F} = e[u \frac{\partial}{\partial T} + \frac{1}{pv} \frac{\partial}{\partial u}(1 - u^2)]$ — скорость; p — импульс; T — кинетическая энергия электрона; $u = \cos \theta$; θ — угол между вектором импульса