

УДК 544.54; 544.546:544.35

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И ВЫДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ОТХОДОВ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

У статті здійснюється аналіз технологій очистки радіоактивних відходів. Показано, що технології, в основі яких є процеси радіаційної модифікації, є перспективними. Запропоновано метод теоретичного аналізу ізотопного складу радіоактивних відходів за допомогою еволюційного алгоритму

Ключові слова: очистка радіоактивних відходів, радіаційна модифікація

В статье проводится анализ технологий очистки радиоактивных отходов. Показано, что технологии, основанные на процессах радиационной модификации сорбентов радиоактивных отходов, являются перспективными. Предложен метод теоретического анализа изотопного состава радиоактивных отходов с помощью эволюционного алгоритма

Ключевые слова: очистка радиоактивных отходов, радиационная модификация

An analysis of the radioactive waste treatment technologies is presented in this article. We show that technology-based processes, radiation modification of sorbents of radioactive waste are promising. We propose a method for theoretical analysis of the isotopic composition of radioactive waste using an evolutionary algorithm

Key words: radioactive waste treatment, radiation modification

А.Б. Бабич

Кандидат физико-математических наук, научный сотрудник*

E-mail: avbabich@yahoo.com

В.Ф. Клепиков

Доктор физико-математических наук, член-корреспондент НАН Украины, директор, профессор*

Контактный тел.:(057) 704-13-60

В.В. Литвиненко

Доктор технических наук, профессор, ученый секретарь*

В.Н. Робук

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Объединенный институт ядерных исследований

ул. Жолио-Кюри, 6, г. Дубна, Россия, Московская область

Контактный тел.:(057) 700-41-11

В.В. Шатов

Научный сотрудник*

*Институт электрофизики и радиационных технологий

НАН Украины

ул. Гуданова, 13, г. Харьков, 61002

Контактный тел.:(057) 700-41-11

Введение

Современные технологии использования реакций ядерного деления в энергетике связаны с проблемой накопления радиоактивных отходов, характеризующихся различной активностью и временами полураспада. Наибольшие трудности утилизации возникают при утилизации высокоактивных долгоживущих актиноидов. Среди различных подходов к решению данной проблемы отдельное направление занимают технологии, основанные на процессах физико-химической адсорбции радиоактивных элементов естественными минералами, что позволяет существенно удалить во времени процессы их естественной миграции в результате химических (например, выщелачивание) и физических превращений. Это в свою очередь выдвигает ряд требований к материалам сорбентам, поскольку они подвержены воздействию факторов, обусловленных как активностью нуклидов, так и возможными внешними естественными и техногенными факторами, действие которых сопровождается генерированием импульсов давления, вы-

сокотемпературным воздействием, влиянием агрессивных химических сред. Следует заметить, что в качестве сырья для получения указанных сорбентов используются естественные материалы: цирконий-фосфаты, титанаты, цирконаты, алюмосиликаты и др. Достижение требуемых характеристик возможно с использованием технологий прямого синтеза стабильных соединений из компонентов, содержащих радионуклиды. Для достижения данной задачи представляется уникальным использование радиационных технологий на основе мощных порядка 50-100 кВт ускорителей электронов. Эффективность их применения обусловлена как возможностью протекания твердофазных превращений в минеральном сырье, что позволяет снизить температуру технологического процесса. Другой стороной, обуславливающей перспективность использования радиационных технологий для синтеза сорбентов, является особенность технологического процесса, состоящая в формировании заданной структуры и химического состава в условиях воздействия ионизирующего излучения. Среди современных методов обработки

материалов для достижения заданных свойств одними из наиболее перспективных являются те, которые предполагают модификацию вещества в условиях, приближенных к эксплуатационным. Так, в радиационном материаловедении этот аспект известен как программно-упрочняемые материалы. Радиационная обработка является весьма емкой по количеству инициируемых процессов, ответственных за достижение требуемого технологического эффекта. Изучение роли механизмов, ответственных за изменение структурно-фазового состояния облученного вещества, является определяющей задачей при разработке радиационных технологий на основе мощных электрофизических источников. В случае же использования мощных потоков ионизирующего излучения в крупнотоннажных производствах отдельной задачей является описание процессов тепломассопереноса. Так в работе [2], отмечается, что при синтезе ортосиликата кальция с использованием мощных источников ионизирующего излучения существенно снижается энергия активации процесса, повышается роль процессов на границе раздела фаз, уменьшается зависимость кинетики от наличия минералов, образующих жидкую фазу. Синтез алюмосиликатов по данным работы [3] имеет также особенность нелинейной зависимости кинетики радиационного выхода от температуры облучения, в то время как весьма важным для оценки сорбционной емкости является возможность контроля за соотношения алюминия и кремния в сорбенте. В силу указанных источников нелинейностей использование уравнений диффузионной кинетики для моделирования радиационного выхода не позволяет описать многофакторность процесса и ставит задачу привлечения более адекватного математического аппарата.

Сравнительный анализ технологий очистки радиоактивных отходов

Как указывалось выше, особенностью радиационно-технологического процесса, использующего в качестве воздействующего фактора на минеральное сырье активирующее действие ионизирующего излучения, внешний источник температурного воздействия а также интенсивное перемешивание, является достаточно сложная задача выбора адекватно описывающей математической модели. В основе многих современных подходов к моделированию сложных стохастических процессов лежит системный анализ, на принципах которого решаются задачи построения моделей и отработки многофакторных технологических процессов. Электрофизический радиационно-технологический процесс в ОО представляет собой многочастичную систему, распределенную в среде, характеризующейся наличием различных фаз, включений, сегрегаций, агрегатных состояний (например, расплавы вдоль треков частиц). Отличительной чертой импульсного радиационно-технологического процесса является его стохастичность, что обуславливается наложением гидродинамических явлений на процессы массо- и теплопереноса. Как отмечается в работе [4], нагрев твердых тел КПЭ не позволяет описывать процесс распределения температуры

линейными математическими моделями, поскольку характер изменения скорости нагрева носит немонотонный характер, а на определенных промежутках времени оно имеет локальные экстремумы. Поскольку объектом импульсной радиационной модификации, могут выступать структурно-чувствительные материалы, период воздействия корректнее описывается нелинейной математической моделью, что должно учитываться при установлении связи между параметрами излучения и структурой материала в зоне воздействия. Влияние нелинейностей особенно важно для прогнозирования типов возникающих структур, оценки термических и остаточных напряжений. Для случая воздействия пучка частиц существенным источником нелинейностей теплового и гидродинамического полей является расположение максимума энерговыделения в приповерхностной области.

Основной целью нашей работы является подбор математической модели (нелинейного дифференциального уравнения в частных производных), которая описывала бы образование локальной в пространстве и устойчивой во времени неоднородности в некоторой среде под воздействием внешнего источника излучения. В качестве предполагаемой модели рассмотрим нелинейное дифференциальное уравнение в частных производных представляющее смесь уравнения Бюргерса и уравнения Колмогорова-Петровского-Пискунова:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = f_0 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + (f_1 + f_2 U) \frac{\partial U}{\partial x} + f_3(x, t) + f_4 U + f_5 U^2 + f_6 U^3$$

Динамическая переменная $U=U(x,t)$ описывает изменение концентрации вещества в зависимости от координаты x и времени t .

Здесь все коэффициенты, вообще говоря, могут быть заданными функциями от координат и времени, характеризующими параметры процессов в многокомпонентной среде. Члены при коэффициентах a_{pq} описывают процесс диффузии. Члены при коэффициентах b_{kq} описывают гидродинамическую составляющую процессов в нашей многокомпонентной системе (конвекция, массоперенос). При коэффициентах b_{krq} находятся нелинейности бюргерсовского типа, которые описывают диссипативные процессы (поглощение, рассеяние энергии излучения). Полиномы от динамических переменных U_k описывают процессы взаимодействия между различными компонентами среды (в обобщенном смысле это функция источника или стока, т. е. функция описывающая рождение и уничтожение компонентов сред за счёт их взаимодействия, при этом коэффициенты $c_{...}$ так же могут быть функциями координат и времени произвольно заданными функциями). По всем повторяющимся индексам производится суммирование от 1 до N . В контексте предлагаемых методов аналитического исследования этих нелинейных моделей для точно интегрируемых систем допустимо рассматривать только полиномы по U_k не выше третьего порядка. Именно для таких моделей мы будем употреблять уже существующий термин модели типа «реакция-дрейф-диффузия» или модели РДД.

Коэффициенты $f_k=f_k(x,t)$ в общем случае так же могут зависеть от координаты и времени и, как правило, задаются заранее в зависимости от характеристик сырья и параметров технологического процесса, описываемого данным уравнением. В первую очередь мы подбираем простейшую дробно-полиномиальную функцию для описания поведения среды

$$U = \frac{t^{20}}{(x^2+k)t^{20}+p}$$

таким образом, чтобы начальное условие $U|_{t=0}=0$ было константой, а при $t \rightarrow +\infty$ функция $U(x,t)$ стремилась бы к локальному максимуму $U|_{t \rightarrow \infty} = \frac{1}{x^2+k}$. Теперь с помощью подстановки функции в исходное уравнение мы можем определить явный вид функции источника $f_3=f_3(x,t)$. При этом потребуем, что остальные коэффициенты f_k константы и сама функция источника имеет вид локального максимума во времени и пространстве. После выполнения всех этих требований получаем: $f_0=1, f_1=0, f_2=0, f_4=0, f_5=-6, f_6=8k$, и

$$f_3 = 4t^{19}p \frac{5t^{20}x^2 + 5t^{20}k + 5p + 2t^{21}}{(t^{20}x^2 + t^{20}k + p)^3}$$

Теперь основное уравнение приобретает вид:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + f_3(x,t) - 6U^2 + 8kU^3$$

Отсюда видно, что для образования локальной устойчивой неподвижной неоднородности под воздействием локального импульсного источника мо-

жет служить не модель Бюргерса, а модель Колмогорова-Петровского-Пискунова с неоднородной переменной функцией источника.

Определение изотопного состава РО

Задача определения изотопного состава РО может быть решена различными способами. В первую очередь это спектральный анализ излучения РО [5]. Однако результаты такого анализа нуждаются в дополнительной теоретической проверке. Для такой проверки можно использовать программные технологии, основанные на применении эволюционного алгоритма. Связано это с тем, что принципиальная возможность динамического контроля компонентного состава радиоактивных образцов обусловлена тем, что зависимость полной активности радиоактивного образца от времени определяется законом радиоактивного распада. Динамически контролируя полную активность образца и оптимизируя параметры закона радиоактивного распада для совокупности различных изотопов радиоактивных ядер, мы имеем возможность определить количество радиоактивных ядер данного сорта в любой (будущий) момент времени [6].

Выводы

Из приведенного анализа видно, что для образования локальной устойчивой неподвижной неоднородности под воздействием локального импульсного источника может служить не модель Бюргерса, а модель Колмогорова-Петровского-Пискунова с неоднородной переменной функцией источника.

Литература

1. Кесслер, Г. Ядерная энергетика [Текст]: пер. с англ. – Ю. Митяев; М.: Энергоатомиздат, 1986. 264 с.
2. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники [Текст] / Н.В. Кельцев. – М.: Химия, 1984. – 357.
3. Рыкалин Н.Н. Воздействие концентрированных потоков энергии на материалы [Текст] / Н.Н.Рыкалин. –М.:Наука. 1989- 268 с.
4. Кольчужкин А.М. Введение в теорию прохождения частиц через вещество [Текст] / А.М. Кольчужкин, В.В. Учайкин В.-М.: Энергоатомиздат, 1978.- 180 с.
5. Ляпидевский В.К. Методы детектирования излучений [Текст] / В.К. Ляпидевский. – М.: Энергоатомиздат, 1987.- 408 с.
6. Самоорганизация в программных средах [Текст]. В.Ф. Клепиков, В.Ю. Корда, В.А. Ямницкий и др. Харьков: Акта, 1998, -108 с.