

УДК 621.039 (035.5)

Г.Г.АНДРЕЕВ, В.И.БОЙКО

ЯДЕРНАЯ ТЕХНИКА, РАЗРАБОТКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ТОПЛИВНОГО ЯДЕРНОГО ЦИКЛА

Рассмотрены научно-технические направления, разрабатываемые на физико-техническом факультете Томского политехнического университета для предприятий ядерно-топливного цикла. Изложены физико-химические и технологические основы интенсификации процессов отдельных стадий производства гексафторида урана, безводного фтористого водорода, элементного фтора, фторидов галогенов и редких металлов. Приведены результаты исследований по применению ультразвука для рафинирования металлического урана и плутония, а также дезактивации технологического оборудования. Отмечены основные результаты исследований по разработке новых методов разделения изотопов и использованию плазменных технологий в процессе изготовления ядерного топлива. Даны сведения о разработке систем контроля, диагностики и автоматического управления физическими и технологическими объектами.

Введение

Научно-технические направления, разрабатываемые на физико-техническом факультете, объединены проблемами ядерной энергетики, ядерной физики и ядерно-химической технологии.

Для получения энергии в ядерном реакторе на АЭС необходимы в достаточном количестве делящиеся нуклиды. Их три: ${}_{92}^{235}\text{U}$, ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ и ${}_{92}^{233}\text{U}$. В природе в естественном виде имеется уран, состоящий из изотопов ${}_{92}^{235}\text{U}$ (~0,72%) и ${}_{92}^{238}\text{U}$ (~99,28%). Два других нуклида получают искусственным путем в ядерных реакторах.

В большинстве типов реакторов используется уран, содержащий несколько процентов ${}_{92}^{235}\text{U}$. Для получения такого ядерного топлива необходим ряд последовательных технологических операций (циклов). Совокупность таких операций, включающих все основные стадии общего технологического процесса, осуществляемые на сложных комплексах предприятий атомной промышленности, называют ядерным топливным циклом (ЯТЦ). После добычи урана из его месторождений он перерабатывается в ядерно-чистые промежуточные продукты, представляющие собой оксиды урана U_2O_8 или его тетрафторид UF_4 . На следующей стадии их превращают в газообразный гексафторид урана UF_6 . Далее UF_6 на обогатительных заводах с помощью технологий разделения изотопов доводят до нужной концентрации по изотопу ${}_{92}^{235}\text{U}$. Гексафторид обогащенного урана химическим путем превращают в UO_2 , из которого изготавливают топливные таблетки. Таблетками заполняются тепловыделяющие элементы, которые конструкционно объединяются в тепловыделяющие сборки (ТВС). В активной зоне реактора в результате процесса деления содержание ${}_{92}^{235}\text{U}$ уменьшается, образуются радиоактивные продукты деления и нуклиды трансурановых элементов. Отработавшее топливо с высокой радиоактивностью, более чем в 10^6 раз превышающей активность свежего топлива, после длительной выдержки направляют на радиохимический завод. Радиохимическая переработка и регенерация топлива с извлечением, разделением и очисткой ценных компонентов, обезвреживанием и удалением радиоактивных отходов являются важнейшей составной частью предприятий ЯТЦ атомной промышленности.

Направления научных работ кафедр и лабораторий ФТФ связаны практически со всеми операциями и процессами ЯТЦ, включая физико-химические переделы, эксплуатацию ядерных реакторов, проблемы защиты от ионизирующего излучения и обращения с радиоактивными отходами.

1. Разработка физико-химических основ для интенсификации процессов отдельных стадий технологии ядерного топлива

(Работа выполнена коллективом сотрудников кафедры химической технологии редких, рассеянных и радиоактивных элементов. Руководители – Н.П.Курин, Г.Г.Андреев)

1.1. Технология гексафторида урана

Наиболее значительные научно-технические достижения ученых физико-технического факультета связаны с разработкой фторидной технологии ядерного топлива для АЭС и транспортных средств, и в частности с технологией соединения UF_6 , через которое проходит практически весь уран, добываемый из недр. UF_6 является единственным газообразным соединением, используемым в обогащении ядерного топлива изотопом $^{235}_{92}U$. Мировая потребность стран западного мира в UF_6 (без России) имеет непрерывную тенденцию к росту и согласно прогнозам достигнет к 2000 году 81,2 тыс. тонн в год.

Современное промышленное производство UF_6 за рубежом основано на высокотемпературной газификации твердого UF_4 элементарным фтором в пламенных реакторах с прямотоком фаз. Эти типовые аппараты разработаны в 50-х годах и с тех пор находятся в постоянной эксплуатации. Исследования по конструкциям новых фтораторов не проводились. Технологические схемы являются громоздкими, многоступенчатыми, с большими производственными площадями и, по нашему мнению, являются малоэффективными с высокой стоимостью передела 3 – 5 \$ за 1 кг UF_6 .

В ТПУ разработан принципиально новый тип аппарата со свободной противоточной газозвесью для резкой интенсификации процессов во фторидной технологии летучих и нелетучих фторидов урана для отечественных заводов. Впервые теоретически обоснована и экспериментально исследована гидродинамика газозвеси с урансодержащими порошками. Выведены основные закономерности и характер движения двухфазного потока по высоте и сечению аппарата. Разработана методика, позволяющая с учетом физико-химических процессов, протекающих в газозвеси, проводить расчет конструкций промышленных аппаратов. Предложены математические модели аппаратов, позволяющие проводить процессы фторирования, с управлением непосредственно от ЭВМ. Разработанная аппаратура испытана и внедрена с высоким экономическим эффектом на всех заводах Минатома России: Сибирском химическом комбинате (СХК) и Ангарском электролизном химическом комбинате (АЭХК) – и позволяет работать не только на тетрафториде урана, но и на его оксидах. В результате созданы самые короткие и высокоэффективные технологические схемы с автоматизированным управлением от ЭВМ, не имеющие в урановой промышленности аналогов в мире. Разработка удостоена Государственной премии СССР.

1.2. Технология безводного фтористого водорода

Безводный фтористый водород является исходным сырьем для получения элементарного фтора, который, в свою очередь, используется при получении гексафторида урана.

В промышленности фтористый водород получают взаимодействием плавикового шпата – CaF_2 с концентрированной серной кислотой при температурах около 200°C. Процесс сульфатизации проводят в трубчатых вращающихся печах. Он характеризуется большой длительностью процесса (2 – 3 часа), высокими энергетическими затратами и малой интенсивностью. Причиной этих недостатков являются низкие коэффициенты теплопередачи через стенку печи, а также через слой образующегося сульфата кальция $CaSO_4$ на поверхности реагирующих частиц CaF_2 . Для интенсификации процесса предложено оптимизировать температурный режим прямым пропусканием электрического тока через электропроводную реакционную массу $CaF_2 - H_2SO_4$.

Проведены кинетические исследования, которые показали, что при 200°C процесс взаимодействия заканчивается за 6 – 10 минут. Для этой цели было разработано несколько типов аппаратов, основным элементом которых являлись внутренние электроды из аморфного углерода, к ним подводился двух- или трехфазный переменный электрический ток промышленной частоты. В результате такой организации теплоотвода степень разложения достигала около 98 %, а интенсивность процесса увеличивалась в 10 – 20 раз.

В целом, было разработано и испытано 5 конструкций аппаратов с прямым электрическим нагревом, защищенных авторскими свидетельствами.

1.3. Технология элементного фтора

В настоящее время в России и за рубежом элементный фтор получают путем электролиза расплавов $KF \cdot 2HF$ в среднетемпературных бездиафрагменных электролизерах униполярной конструкции с токовой нагрузкой 6 – 10 кА. Низкие техноэнергетические характеристики: выход фтора по току около 90%, удельные затраты электроэнергии 18 – 22 кВт·ч/кг фтора, плотность тока на электродах 0,08 – 0,1 А/см², небольшая производительность электролизеров (6 – 12 кг/ч) – определяют высокую стоимость получаемого фтора. Интенсифицировать электрохимический процесс предложено организацией принудительной циркуляции электролита в межэлектродном пространстве. Это позволяет увеличить плотность тока на электродах, а соответственно и производительность электролизеров.

Из-за недостаточной изученности процессов были проведены исследования физико-химических свойств системы $KF \cdot nHF$, отсутствующих в научно-технической литературе, в частности: плотности и вязкости расплава $KF \cdot HF$, поверхностного натяжения, электропроводности, теплоемкости и теплопроводности, растворимости фтора и водорода, изучен механизм газообразования и газовой выделения фтора и водорода на электродах и ряд других. Проведены исследования электродных процессов, протекающих при электролизе системы $KF \cdot nHF$. Экспериментально измерена ЭДС электрохимической реакции разложения HF ; изучена кинетика и механизм перехода заряда через двойной электрический слой; исследованы параметры электрохимической диффузионной кинетики; измерены перенапряжения диффузии анодного и катодного процессов и получены эмпирические уравнения предельных диффузионных токов; определены значения коэффициентов диффузии анионов и катионов, описываемые соответствующими эмпирическими уравнениями; определены объемная концентрация разряжающихся ионов, толщина диффузионного слоя для анодного и катодного процессов, энергия активации диффузионного процесса. Предложены методы снижения перенапряжений и интенсификации процесса получения элементного фтора за счет использования принудительной циркуляции электролита, а также развития поверхности электродов и использования питания ячеек импульсным током.

На основе выполненных исследований были разработаны конструкции электролизных установок с принудительной циркуляцией электролита и диафрагменные электролизеры униполярной и биполярной конструкции. Применение диафрагм и принудительной циркуляции электролита позволяет значительно уменьшить межэлектродное расстояние, снизить газонаполнение электролита и повысить плотность тока на электродах до 1,0 А/см².

На СХК были созданы и испытаны в производственных условиях высокоинтенсивные среднетемпературные фторные электролизеры с принудительной циркуляцией электролита, не имеющие аналогов в мировой практике. В этих электролизерах процесс электролиза расплава $KF \cdot nHF$ проводился при плотностях электрического тока на анодах 0,1 – 1,0 А/см² с выходом фтора по току до 98% в электролизерах униполярной конструкции и 90% – в электролизере биполярной конструкции. Производственными испытаниями установлены оптимальные параметры технологического режима, при которых достигается значительная экономия электроэнергии при одновременном увеличении производительности.

Этими исследованиями доказана возможность создания высокоинтенсивных, экономичных фторных электролизеров большой единичной производительности (20 – 30 кг фтора в час).

1.4. Фториды галогенов: синтез, свойства, применение

Фториды галогенов характеризуются комплексом специфических свойств: обладают высокой химической и окислительной способностью, являются сильными фторирующими и галогенирующими реагентами и неводными ионизирующими растворителями и комплексообразователями. Все перечисленные свойства различны для каждого интергалоида, что позволяет сделать выбор реа-

гента или составить их смесь с заданными свойствами. Изменить их свойства можно также применением инертных растворителей (фтористого водорода, фреонов и т.д.). Кроме этого, в соответствии со своими физическими свойствами фториды галогенов могут использоваться в конденсированном или в газообразном состояниях как при повышенных, так и при пониженных давлениях и температурах. Изучение кинетики процессов взаимодействия фтора с другими галогенами динамическим (проточным) методом при различных температурах, скоростях газовых потоков, соотношениях реагирующих компонентов, содержании инертных газов, диаметрах и материалах реакторов и т.д. позволило установить вероятный механизм процессов синтеза ClF_3 , BrF_3 , BrF_5 , IF_5 , IF_7 , который относится к гомогенно-гетерогенному цепному типу. В технологии ядерного топлива процессы фторирования соединений урана занимают важнейшее место. Применение элементарного фтора не всегда позволяет вести процессы с наибольшей интенсивностью и полнотой, применение же фторидов галогенов часто дает возможность решить эти проблемы. Изучение взаимодействия газообразного ClF_3 с UO_2 (в том числе и таблетированным) показало, что процесс протекает с большей скоростью по сравнению с фтором при более низких температурах.

Жидкофазное фторирование с использованием указанных фторидов галогенов характеризуется хорошей теплопередачей, низкими температурами. Скорость растворения легко регулируется изменением температурного режима и применением растворителей (например безводного HF). В связи с этим были проведены обширные кинетические исследования по изучению взаимодействия жидких смесей $\text{BrF}_3 - \text{HF}$ и $\text{ClF}_3 - \text{HF}$ с UO_2 (таблетированным, спеченным, диспергированным в различных металлических матрицах) и с другими урансодержащими материалами. Установлено, что во всех случаях происходит полное превращение урана в UF_6 . Продолжительность полного растворения в зависимости от концентрации BrF_3 или ClF_3 (20 – 100 % масс.) и температуры (от +20 до +80 °C) изменяется от нескольких минут до нескольких часов. В результате осуществления процессов фторирования урансодержащих материалов фторидами галогенов образуются бинарные или многокомпонентные системы на основе UF_6 , BrF_3 , ClF_3 , IF_5 , HF , которые необходимо разделить с целью выделения UF_6 , и регенерации фторирующих реагентов. Для расчетов и осуществления процессов разделения необходимы данные по фазовым равновесиям в этих системах.

С этой целью, а также для развития учения о физико-химических свойствах фторидов галогенов было проведено изучение конденсированных тройных систем $\text{UF}_6 - \text{BrF}_3 - \text{HF}$, $\text{UF}_6 - \text{BrF}_3 - \text{IF}_5$ и составляющих их бинарных систем. Эти данные явились основой для последующих исследований равновесий жидкость – твердое тело – пар в тройных системах $\text{UF}_6 - \text{ClF}_3 - \text{HF}$, $\text{UF}_6 - \text{BrF}_3 - \text{HF}$ и в составляющих их бинарных системах. Термодинамико-топологический анализ полученной информации позволил разработать технику безопасного обращения и наиболее рациональные схемы разделения этих систем.

Проведенные исследования закладывают фундаментальную научную базу для создания новой низкотемпературной фторидной технологии переработки облученного ядерного топлива АЭС в будущем.

1.5. Рафинирование и повышение выхода металлического урана и плутония

Металлический уран высокой степени обогащения по изотопу $^{235}_{92}\text{U}$ и металлический плутоний используются для приготовления зарядов в ядерном и термоядерном оружии. Они должны иметь минимальное содержание сопутствующих как нейтронно-активных примесей, так и примесей, влияющих на физико-механические и структурные свойства. На основании изучения термодинамики и кинетики процессов удаления газовых, металлических и неметаллических примесей, процессов кристаллизации предложен и разработан вакуумно-ультразвуковой способ повышения чистоты, физико-механических и структурных свойств металлических урана и плутония.

В лабораторных условиях на природном металлическом уране проведены исследования по установлению закономерностей процессов дегазации, ликвации и кристаллизации металла в поле

упругих колебаний ультразвуковых частот. Исследования проводились как при бесконтактном способе введения ультразвука в расплав при использовании пондеромоторного эффекта в плавильных тиглях резонансных размеров, так и при контактном способе. В последнем случае упругие колебания генерируются магнитострикционным преобразователем и через волноводную систему и соответствующий рабочий инструмент вводятся в расплав металла при соответствующей температуре и вакууме. «Озвучивание» металлического урана производят в твердом состоянии во всех его модификациях, а также при переходах из одной аллотропной формы в другую.

Положительные результаты исследований послужили основанием для разработки и создания на СХК опытно-промышленной установки на базе стандартной печи ЛВИЗ-300. Для нагрева использовался преобразователь частоты ВПЧ-100/2400. Источником упругих колебаний служил магнитострикционный преобразователь. Волноводная система включает в себя элементы, изготовленные из стали 45, титана марки ВТ-8 и тантала. Исследования проводили на первичном и вторичном металлическом плутонии и получили положительные результаты. Дегазация в ультразвуковом поле идет не только с поверхности расплава, но и в объеме. Суммарная степень очистки от примесей повышается до 26%. Структура «озвученных» образцов – мелкозернистая, квазиизотропная, размер зерна порядка 30 мкм. Существующий вакуумный способ рафинирования не дает таких высоких показателей.

Развитие этого направления привело к разработке способа повышения выхода в слиток урана и плутония путем обработки высокочастотной вибрацией продуктов реакции металлотермического восстановления. Исследования проводились с использованием электромагнитного вибратора в широких диапазонах упругих колебаний по частоте и амплитуде. В качестве исходного сырья использовался тетрафторид урана двух сортов и стружка металлического кальция. Прессованные брикеты шихты с разным процентным содержанием кальция загружались в реактор. Шихта в реакторе за счет внешнего нагрева нагревалась до определенной температуры, включался запал шихты и одновременно – источник вибрации. При оптимальной частоте, амплитуде, избытке кальция, температуре предварительного нагрева шихты и времени обработки вибрацией выход в слиток увеличивался на 3%. После разработки аппаратуры для промышленного производства способ успешно внедрен на химико-металлургическом заводе СХК со значительным экономическим эффектом.

На основе результатов исследований гетерогенных процессов в высокоэнергетических акустических полях проведены всесторонние исследования по извлечению урана из трудновскрываемых отходов металлургических производств.

1.6. Дезактивация технологического оборудования

На предприятиях атомной промышленности одной из важнейших является проблема очистки технологического оборудования от радиоактивных загрязнений или его дезактивация. Существующие методы дезактивации не эффективны и связаны с высокими трудозатратами. Для решения этой проблемы предложен и разработан способ дезактивации технологического оборудования совместным действием ультразвука и растворов химических реагентов. В лабораторных и производственных условиях проведены крупномасштабные исследования по отработке оптимальных режимов процесса дезактивации, которые послужили основанием для внедрения данного способа при соответствующем аппаратном оформлении на газодиффузионном и сублиматном заводах СХК. В дальнейшем данные разработки были внедрены на химико-металлургическом и радиохимическом заводах, а также на других предприятиях Минатома РФ.

Процесс проводится в ультразвуковых ваннах, где дезактивируемые малогабаритные детали весом 120 и 150 кг совершают сложные движения. Источником ультразвука служат магнитострикционные преобразователи с диапазонами частот от 18 до 25 кГц. В качестве дезактивирующих растворов используются водные растворы минеральных и органических кислот, щелочей и солей различных концентраций. Температура процесса, в зависимости от типа и состава рабочих растворов, колеблется в диапазоне 40 – 80°C. Данный способ позволяет извлекать такие дорогостоящие

материалы, как уран, высокообогащенный по $^{235}_{92}\text{U}$, плутоний, а также и радиоактивные изотопы элементов, дезактивируя оборудование до санитарно-допустимых норм и фоновых значений по α -, β - и γ -активности.

В настоящее время отработаны оптимальные режимы для дезактивации оборудования газо-диффузионного, сублиматного, химико-металлургического и радиохимического заводов, проектно-техническая документация, в том числе и в ядерно-безопасном исполнении для цехов дезактивации оборудования.

1.7. Фторидная технология редких и рассеянных элементов

Новую ступень развития фторидная технология достигла в цикле работ по разработке технологических основ процессов фторирования элементов ванадия, ниобия, тантала, молибдена, вольфрама, рения и металлов платиновой группы как в виде чистых металлов, так и полупродуктов, концентратов и промышленных отходов, а также по использованию этих фторидов для получения готовых изделий.

Фторидная технология редких тугоплавких металлов имеет неоспоримые преимущества перед традиционными технологиями переработки богатых концентратов и металлических отходов данных металлов. Основными достоинствами фторидной технологии является её универсальность, возможность получения чистых фторидов из отходов машиностроения, светотехнической промышленности и непосредственно из промышленных концентратов, сокращение количества стадий от продукта переработки до металла и готового изделия.

Спектр использования фторидов этих металлов очень широк: нанесение покрытий тугоплавких металлов, получение порошков и компактных металлов методом водородного восстановления соответствующих фторидов из газовой фазы, использование их для легирования или в качестве фторирующих агентов. Причем водородным восстановлением можно получать как чистые металлы, так и сложные композиции, например вольфраморениевые, танталониобиевые сплавы и покрытия, карбиды при температурах на 2000 – 2500°C ниже температуры плавления этих веществ.

Методологию разработанной фторидной технологии можно рассмотреть на примере переработки отходов вольфрама, содержащих торий, и нанесение вольфрамовых покрытий методом газофторидной металлургии на поверхности тиглей из графитовых материалов. Кроме возврата ценного продукта – вольфрама – в производство решается ещё и важная экологическая задача, связанная с хранением тория.

В светотехнической промышленности для катодов и спиралей мощных источников света используется вольфрам с присадкой оксида тория (марки ВТ). Выход кондиционного материала при производстве торированного вольфрама невысок (составляет 30 – 40%) и отходы в значительных количествах скапливаются на электроламповых заводах. Так, на Московском электроламповом заводе образуется и складывается до 2,5 тонн в год отходов торированного вольфрама, обладающих определенной радиоактивностью, которая в процессе хранения возрастает за счет более жесткого излучения дочерних продуктов. По традиционной технологии некондиционные изделия из вольфрама перерабатываются совместно с промышленными концентратами. Это процесс многостадийный, причем для переработки торированного вольфрама необходима организация специального радиохимического производства.

Для переработки этих отходов была разработана технология, заключающаяся в прямом фторировании торийсодержащих отходов элементарным фтором, позволяющая провести отделение вольфрама от тория в одну стадию. При фторировании отходов образуется летучий гексафторид вольфрама и нелетучий тетрафторид тория и, таким образом, достигается их разделение. Последний может быть направлен на захоронение или на предприятия, производящие торированный вольфрам, потребность в котором в странах СНГ велика.

Гексафторид вольфрама, полученный при фторировании отходов торированного вольфрама, очищенный перегонкой, был использован для нанесения вольфрамовых защитных покрытий на поверхность тиглей из стали, графита и из силицированного графита. Были определены оп-

тимальные температурные и концентрационные условия формирования качественных пленок из металлического вольфрама.

Разработанная фторидная технология может быть также применена для получения рениевых продуктов. Существующая технология получения рениевых продуктов и концентрата – перрената аммония – включает длительную и трудоемкую стадию очистки от калия, ухудшающего качество готовых изделий из рения. Одним из возможных путей совершенствования технологии получения рения является использование газифторидной схемы переработки металлических отходов и концентратов рения, вольфрама и молибдена. Данная схема содержит одно из звеньев малоотходной технологии – использование водородсодержащего «катодного» газа фторного электролизера (93 – 95 % водорода и 5 – 6 % фтористого водорода) для восстановления перрената аммония и гексафторида рения до металлического рения. Использование фторидной схемы переработки перрената аммония: восстановление его «катодным газом», фторирование полученного порошка рения элементарным фтором и восстановление гексафторида рения водородом позволяет дополнительно очищать готовый продукт – металлический рений – от калия, железа, марганца и других элементов, образующих труднолетучие фториды.

Пентафториды подгруппы ванадия нашли применение при легировании сплавов, нанесении покрытий и получении сверхпроводящих сплавов методом водородного восстановления из газовой фазы. Необычайно перспективным является использование пентафторидов ванадия, ниобия, тантала во фторорганическом синтезе. Если пентафториды ниобия и тантала могут быть использованы только в качестве катализаторов фторирования, то пентафторид ванадия является очень эффективным новым фторирующим агентом, сравнимым по фторирующей способности с дифторидом ксенона, но обладающим целым рядом преимуществ перед последним. (Он легко фторирует ненасыщенные полифторолефины, образуя полифторалканы, которые являются основой для синтеза безхлорсодержащих хладонов и серии хлорфторэтиленов, которые используются для получения фторопластов, фторкаучуков и фторированных резин, причем пентафторид ванадия, в отличие от всех известных фторагентов, селективно фторирует только кратные связи с низким процентом деструкции молекулы органического соединения.) В новосибирском Институте органической химии с помощью пентафторида ванадия, полученного сотрудниками ТПУ и СХК, было синтезировано большое количество фторорганических соединений, в том числе ранее неизвестных.

Разработана технология синтеза фторидов подгруппы ванадия из различных видов сырья: чистых порошков, отходов машиностроения, полупродуктов и промышленных концентратов – фторированием последних элементарным фтором. Оптимизированы условия получения чистых фторидов.

2. Разработка новых методов разделения изотопов и плазменных технологий

(Работа выполнена коллективом сотрудников кафедры технической физики. Руководитель – Тихомиров И.А.)

2.1. Разделение изотопов и тонкая очистка веществ

Широкое применение изотопов в ядерной энергетике, науке и технике и связанное с этим увеличение их производства требует разработки новых, простых, безопасных и высокопроизводительных методов разделения изотопов.

Средствами молекулярной физики с широким применением методов математического моделирования проведены фундаментальные и поисковые исследования теоретического и экспериментального характера по решению проблем, связанных с разделением изотопов и тонкой очисткой веществ. Эти работы носят комплексный характер, предусматривающий стратегию направленного поиска систем с максимальными эффектами разделения, разработку теории процессов, постановку экспериментов с определением оптимальных условий их проведения. Перспективные направления поисковых исследований по разделению изотопов и тонкой очистке веществ связаны с применением электроионизационных и обменных процессов.

Разработана теория изотопного разделения при электромиграции в системах с применением гранулированных ионитов и ионообменных мембран, учитывающая особенности электропереноса в фазах и позволяющая расчетным путем определять высоту эквивалентной теоретической тарелки, время установления стационарного состояния, достигаемую степень изотопного разделения.

Разработаны новые методы разделения изотопов. Среди них: разделение изотопов при противоточной электромиграции в колоннах с гранулированным ионитом, при встречном движении ионов в системах ионит – раствор, при сочетании электродиализа и электрохроматографии, при изотопном обмене между несмешивающимися фазами.

В цикле проведенных исследований впервые обстоятельно изучены возможности применения электродиализных процессов для разделения изотопов и тонкой очистки веществ с решениями экологических проблем.

Путем расчета β -факторов показана возможность проведения направленного поиска обменных систем, характеризующихся максимальными эффектами разделения изотопов.

Для анализа влияния основных факторов обменных процессов на равновесные характеристики систем предложен метод построения лучевых диаграмм, позволяющий с целью оптимизации определять области максимальных значений коэффициентов разделения.

Второе направление научных разработок кафедры в рассматриваемой области связано с совершенствованием существующей технологии изотопного разделения.

В указанном направлении проведены исследования по математическому моделированию процессов изотопного разделения в каскадах применительно к стационарным и нестационарным режимам их работы.

Получены результаты для оптимизации каскадов и разработки автоматизированных систем управления ими.

Полученные экспериментальные результаты, разработанные математические модели, предложения и рекомендации применительно к повышению эффективности существующих производственных разделительных процессов использованы и внедрены на предприятиях Минатома Российской Федерации.

2.2. Плазменные технологии

Плазменно-химические технологии в процессах изготовления ядерного топлива начали использоваться с начала 60-х годов. Первые работы связаны с ВЧ-разрядом. Перспективные научно-технические и технологические разработки затем продолжались в направлении не только переработки газовых компонент, но и водносолевых растворов с целью получения оксидов металлов, необходимых атомной промышленности.

С 1970 г. начались исследования по использованию плазмы ВЧ-разрядов для моделирования процессов входа космических аппаратов в плотные слои атмосферы и для проведения испытаний материалов и пиротехнических составов, используемых в ракетно-космической технике. Работы выполнялись с целью обеспечения жизнеспособности космических аппаратов.

Исследования по использованию плазмы в технологии и технике продолжают на кафедре в направлении анализа процессов взаимодействия плазмы с веществом и получения дисперсных (и ультрадисперсных) материалов. Получены каталитически активные смеси УДП-оксидов переходных и редкоземельных металлов, которые, как показали испытания, можно использовать для очистки вредных газовых выбросов и интенсификации процессов горения жидких топлив.

Интенсивно развивается диагностика характеристик ВЧ-плазменных потоков при их взаимодействии с веществом. Разработана лазерная диагностика изменения функции распределения частиц по размерам в потоках плазмы, диагностика состава многокомпонентных плазменных потоков методами масс-спектрометрии и оптической спектроскопии. Проведен термодинамический анализ специфики процессов взаимодействия плазмы с веществом. Проведенные исследования позволили установить доминирующие процессы, влияющие на характеристики и свойства плазмы, что имеет определяющее значение при разработке технологии и техники плазменных процессов.

3. Разработка систем контроля, диагностики и автоматического управления физическими и технологическими установками

(Работа выполнена коллективом сотрудников кафедры «Электроника и автоматика физических установок»)

3.1. Диагностика активной зоны ядерных реакторов

На первом этапе становления и развития атомной энергетики и научной школы кафедры проводилась разработка устройств и создание методик диагностики активной зоны промышленных уран–графитовых реакторов. Ряд разработок был внедрен в производство:

- малогабаритная промышленная телевизионная установка, предназначенная для просмотра внутренних стенок и торца технологических каналов ядерных реакторов;
- сортировочный автомат с устройством для поштучного счета облученных тепловыделяющих элементов;
- ряд измерительных приборов и сигнализаторов влажности;
- серия газоанализаторов на кислород и на аргон в азоте;
- сеточная модель активной зоны ядерного реактора и устройство для исследования кинетики реактора на электронной сеточной модели;
- методика стабилизации параметров термонейтронных датчиков;
- методика измерения рН для использования в первом контуре ядерного реактора.

Разработанные совместно с СХК датчики внутриреакторного контроля (миниатюрные термонейтронные датчики) послужили базой для успешного проведения работ по созданию специализированных вычислительных устройств контроля за распределением нейтронного потока в активной зоне промышленных уран–графитовых ядерных реакторов. Среди них устройства:

- вычисления коэффициентов усреднения аксиальных и азимутальных распределений нейтронного потока;
- восстановления непрерывных кривых распределения нейтронного потока по высоте активной зоны.

Развитие исследований по диагностике состояния активной зоны ядерных реакторов включало контроль за энерговыделением, создание систем контроля и регистрации, исследования реактора как многомерного объекта с целью автоматического выравнивания распределения нейтронного потока по объему активной зоны; создание методик и аппаратуры для регистрации спектра шумов в активной зоне реактора с целью определения динамических характеристик; изучение решетки системы управления и защиты для выбора оптимального расположения стержней активной зоны, разработка и исследование оптимальных алгоритмов обработки данных и устройств ввода информации для автоматизированных систем управления ядерными установками; исследования по созданию нового типа регулирующего органа (так называемый «мягкий» РО). Стендовые испытания последнего на производстве показали, что он позволяет производить контролируемый ввод поглотителя снизу активной зоны и устранять осевые неравномерности.

В рамках этих исследований были проведены разработки ряда устройств:

- разработано устройство измерения оперативного запаса реактивности на органах управления, по методу физического «взвешивания» эффективности органов управления по стержню аварийного регулирования ;
- исследована методика анализа пространственного распределения нейтронного потока по гармоническим составляющим;
- разработана и исследована на сеточной модели реактора 3–х канальная система многосвязного регулирования с перекрестными связями;
- разработано устройство для определения кратковременной и длительной остановки реактора по измерению отрицательной реактивности по ксенону с учетом пространственной неравномерности распределения потока.

Почти все работы доведены до создания действующих макетов с их испытанием в производственных условиях, некоторые из них внедрены в производство.

На базе выполненных исследований и разработок создана и прошла производственные испытания система контроля ядерно-физических параметров ядерного реактора (информационно-вычислительная система) «Юпитер».

Это направление было продолжено комплексом работ по разработке и исследованию много-связных систем автоматического регулирования пространственным распределением нейтронного потока в активной зоне ядерного реактора.

Разработанная система при испытаниях на реакторе подтвердила свою работоспособность и показала, что она обеспечивает устойчивый и качественный процесс регулирования распределения нейтронного потока.

При выполнении этой темы был разработан многоканальный релейно-импульсный регулятор, предназначенный для автоматизации объектов с большим числом регулируемых параметров, а также объектов с распределенными параметрами и быстропротекающими процессами. Он является регулирующим устройством параллельного действия.

Самостоятельное значение имеют исследования, выполненные по вибрации трубопроводов первого контура ядерного реактора, которые позволили определить участки, имеющие наибольшую величину вибраций, их величины при различных режимах работы трубопроводов, определить причины вибраций и дать конкретные рекомендации по их устранению.

Продолжением исследований этого направления явилось создание имитационных моделей сложных трубопроводных систем транспортных ядерных установок с газообразным теплоносителем.

В 70-х годах активизируются исследования по созданию космических ядерных энергетических установок и ядерных реактивных двигателей. Решение вставших при этом задач оказалось невозможным без создания и внедрения современных автоматизированных систем экспериментальных исследований и комплексных испытаний (АСНИ). В связи с этим сотрудники кафедры привлекаются к проведению исследований и автоматизации испытаний ядерных космических энергоисточников.

Коллективом сотрудников разрабатываются, создаются и внедряются в постоянную эксплуатацию автоматизированная система метрологического контроля АСНИ комплекса «Байкал» и другие технические средства автоматизации экспериментальных исследований. Позднее разрабатывается и внедряется в постоянную эксплуатацию автоматизированная система научных исследований теплотехнического стендового комплекса «Ангара», представляющего собой многофункциональную систему с иерархической распределенной структурой. Для обеспечения работы системы в реальном масштабе времени были разработаны высокоэффективные алгоритмы измерения, обработки измерительной информации, регистрации и представления экспериментальных данных и соответствующее программное обеспечение.

3.2. Автоматизация технологических режимов радиохимических производств

Технология и техническая база радиохимических производств достигла к середине 70-х годов высокого уровня развития. Учитывая активность, агрессивность и токсичность перерабатываемых материалов в отрасли остро встала задача оптимального управления технологическими процессами. Это привело к необходимости исследования в области создания автоматизированных систем управления технологическими процессами на базе управляющих вычислительных комплексов.

Высокая стоимость средств вычислительной техники АСУ ТП конца 70-х годов и отсутствие средств микропроцессорной техники обусловила создание высокоцентрализованных систем, в которых все функции сбора, обработки информации и управления выполнялись в одной центральной ЭВМ. Основные усилия были направлены на создание систем прямого цифрового управления, учитывающих индивидуальные особенности автоматизируемого технологического оборудования. В результате совместной работы со службами промышленных предприятий были разработаны

АСУ ТП сублиматных производств. Эти системы внедрены в постоянную промышленную эксплуатацию на двух предприятиях Минатома Российской Федерации и продолжают успешно эксплуатироваться и сегодня.

В настоящее время выполняются работы по модернизации действующих и созданию новых АСУ ТП радиохимических производств.

Для сублиматного завода СХК проводится модернизация ранее разработанной и внедренной АСУ ТП производства гексафторида урана из природных оксидов и тетрафторида урана. Разработаны структура автоматизированной системы управления на базе современных микропроцессорных контроллеров и ПЭВМ и алгоритмы управления технологическими процессами. По разработанному нами техническому заданию лабораторией АСУ ТП НИКИ СХК ведутся проектные работы. Проводятся также работы по созданию подсистем управления АСУ ТП производства переработки высокообогащенного урана. Разработаны математические модели, алгоритмы управления технологическими процессами и методики настройки регуляторов для узлов фторирования и десублимации. В настоящее время разработки находятся в процессе внедрения.

Для радиохимического завода СХК проводятся работы по автоматизации технологического процесса экстракционной переработки облученного ядерного горючего. Разработаны математическая модель процесса, структурная схема системы стабилизации потока органической фазы по каскаду экстракционных колонн очистки урана и плутония, проведено моделирование системы стабилизации на ЭВМ. По результатам работ проведена модернизация промышленных схем автоматического регулирования и перенастройка параметров регуляторов, управляющих выносными пульсационными насосами. Результаты испытаний показали значительное повышение стабильности процесса, и система принята в постоянную эксплуатацию.

Для химического завода АЭЖК разрабатывается автоматизированная система управления технологическими процессами производства фтористого водорода, который используется при переработке урана. Разработаны подсистемы управления процессами приготовления рабочей смеси кислот и стабилизации теплового режима печей разложения флюоритового концентрата. Подсистема приготовления рабочей смеси кислот внедрена в эксплуатацию.

Не теряя традиций в проведении научных исследований, накопленных коллективом кафедры в период своего становления и в последующие периоды, кафедра и в настоящее время проводит интенсивные научные исследования в области создания автоматизированных информационно-измерительных и управляющих систем технологическими процессами и экспериментальными исследованиями на базе микропроцессорных контроллеров и современных средств ВТ для предприятий ядерно-энергетического цикла, химической, пищевой промышленности и других отраслей.

В настоящее время проведен анализ методов, технических и программно-алгоритмических средств повышения информационной надежности автоматизированных систем. Разработаны алгоритмы и программы функционального самоконтроля автоматизированных информационно-измерительных и управляющих систем. Предложен комплексный алгоритм первичной обработки измерительной информации, реализованный в виде программного комплекса. Разработан специальный алгоритм и программное обеспечение для анализа хроматографической информации, обеспечивающие возможность определения площадей не полностью разделенных пиков. Проведен анализ различных методик расчета параметров настройки аналоговых регуляторов промышленных систем автоматического регулирования, на основании чего сформирован банк методик расчетов аналоговых регуляторов САР. Разработана программа вычисления параметров настройки различных типов аналоговых регуляторов по заданным динамическим моделям объектов управления. Разработана структура комплекса технических средств для автоматизации подготовки управляющих программ, ориентированная на использование АТ-совместимых ПЭВМ. Проведена разработка и реализовано программно-алгоритмическое обеспечение канального и транспортного уровней взаимодействия узлов технологической сети. Разработана база данных описания измерительных и управляющих каналов АСУ ТП, АСНИ. Предложены алгоритмы и разработан комплекс программ самонастройки и самоорганизации вычислительного процесса в распределенных автоматизированных системах.