

Для расчетов тяжеловодных и графито-газовых реакторов находит применение гетерогенная методика Фейнберга — Галанина. Пример использования такой методики для решения трехмерной задачи расчета тяжеловодного реактора дан в сообщении Р. Солашилла (Аргентина).

При анализе переходных процессов целесообразно использовать высокооперативные программы с относительно редкими сетками. Из сообщения Х. Мёркла (ФРГ) следует, что при редких сетках вместо конечно-разностных моделей полезно применять методику вероятностей столкновений. В докладе Р. Л. Кроутера обсуждались пути решения задач оптимизации перестановок горючего и перемещения органов регулирования в кипящих реакторах.

Несколько сообщений было посвящено методике расчетов конкретных типов реакторов. Выгорание горючего в водо-водяных энергетических реакторах рассмотрено в трех сообщениях, в одном из которых приведены особенности выгорания в реакторе ВВЭР-3 второго блока Ново-Воронежской АЭС. В трех докладах обсуждались проблемы физических расчетов тяжеловодных реакторов. В докладе Е. Туше (ФРГ) представлены результаты трехмерных расчетов реактора с шаровыми твэлами. Интересное сообщение по физике выгорания горючего высокотемпературного реактора «Драгон» было сделано представителем Европейского агентства по атомной энергии С. Хантом.

В нескольких докладах (Дж. Гриффитс, Канада; Б. Лапонше, Франция и др.) сообщались результаты

экспериментальных исследований изотопного состава облученного горючего. Дж. Гриффитс (Канада) и Б. Лапонше (Франция) продемонстрировали возможность использования данных таких исследований для корректировки применяемых в расчетах сечений.

С интересным обзором экспериментальных работ по исследованию выгорания горючего тяжеловодного реактора «Агеста» выступил Е. Иохансон (Швеция). Современные методы экспериментального исследования выгорания и изотопного состава облученного горючего были рассмотрены в сообщении А. Фаджа (Великобритания). В докладе М. Робина (Франция) обсуждались особенности экспериментальных исследований выгорания горючего в реакторах на быстрых нейтронах.

В ходе дискуссий отмечалась целесообразность дальнейшего уточнения требуемых для расчетов ядерных данных — выделяемой энергии при делении различных изотопов, выходов и сечений характерных продуктов делений, а также сечений Pu^{242} , Am^{241} , Am^{243} , Cm^{242} , Cm^{244} , Pu^{238} и т. д. Советование рекомендовало МАГАТЭ приобрести граммовые количества стандартов плутония, требуемого для изотопного разбавления.

Отмечалась также целесообразность постановки типовой задачи выгорания для сверок и уточнения используемых в расчетах программ и сечений. Советование рекомендовало сформулировать такую задачу в 1972 г., с тем чтобы на следующем совещании можно было сопоставить результаты ее решения.

А. Н. НОВИКОВ

Техника и экономика производства тяжелой воды *

Национальным комитетом по ядерной энергии Италии выпущен сборник докладов, представленных на Симпозиум по технологии и экономике производства тяжелой воды (Турин, 30 сентября — 1 октября 1970 г.).

На симпозиуме наибольшее внимание было уделено двухтемпературному методу концентрирования дейтерия с использованием систем вода — сероводород и аммиак — водород (девять докладов из 15), ректификации жидкого водорода посвящено два доклада и ректификации воды — один.

В настоящее время тяжелая вода производится в основном по схеме двухтемпературного изотопного обмена между водой и сероводородом, одним из авторов и теоретиков которой считается Д. Спивак. На симпозиуме им был прочитан доклад, посвященный развитию этого способа разделения со времени осуществления Манхэттенского проекта до наших дней, когда завершается строительство крупнейших канадских установок. В заключение доклада рассмотрены вопросы расчета и оптимизации процесса на ЭВМ, а также дан анализ на основе этих расчетов и опыта работы Саванна-Риверской установки (США).

Доклад П. Х. Ш. Спрей (Канада) посвящен опыту конструирования и сооружения установок по производству тяжелой воды в Брюсе и Порт-Хоксбери. Дано общее описание установок, рассчитанных на производ-

ство 800 и 400 т D_2O в год. На первой ступени концентрирования используются колонны с ситчатыми тарелками диаметром 8,54 м, причем холодная и горячая колонны конструктивно объединены, так что общая высота объединенной колонны составляет 85 м. С учетом уникальных размеров оборудования рассматриваются требования, предъявляемые к выбору материалов, проектированию, изготовлению и контролю качества изготовления оборудования.

Несколько докладов посвящено двухтемпературному изотопному обмену в системе аммиак — водород. Из них следует отметить доклад П. Брассифорти и др. (Италия) «Проблемы, относящиеся к строительству установки для производства тяжелой воды». В этом докладе в качестве источника дейтерия предлагается использовать синтез-газ, получаемый на заводе синтеза аммиака. В докладе в виде графиков приведены физико-химические свойства чистого и насыщенного аммиаком синтез-газа (энтальпия, удельная теплоемкость, плотность), содержание аммиака в сжатом синтез-газе, представлены данные по кинетике изотопного обмена в функции от температуры, рассмотрены различные варианты построения двухтемпературных схем. Подробно описана двухтемпературная схема с исчерпыванием, принятая для завода в Равенне.

Весьма обстоятельная трактовка результатов испытания двухтемпературного обмена между аммиаком и синтез-газом на пилотной установке представлена в докладе С. Вальтера и Е. Нитшке (ФРГ). Описана опытная установка с колонной диаметром 400 мм производительностью 10 000—12 000 $лм^3/ч$ (рабочее давление 300 атм). Испытывались модифицированные сит-

* Tecnica ed Economia della Produzione di Acqua Pesante. Seric Simposi. Comitato Nazionale Energia Nucleare, Viale Regia Margherita 125, Roma, 1971.

чатые тарелки, обеспечивающие высокую скорость обмена. Авторы рекомендуют строить трехступенчатые каскады с исчерпыванием и объединять такие каскады с установками синтеза аммиака, если концентрация дейтерия в синтез-газе не слишком мала. В этом случае подчеркивается возможность использовать значительную часть оборудования, работающего на установках синтеза аммиака. Учитывая свойства амида калия, используемого в качестве катализатора, предлагается трехступенчатая схема очистки синтез-газа. Для завода производительностью 65 т D₂O в год, работающего на базе аммиачного завода производительностью 100 т NH₃ в сутки, расчетная себестоимость производства 1 кг D₂O не превышает 47,4 долл.

Экспериментальные данные, полученные при испытаниях указанной выше установки, представлены в докладе У. Шиндевольфа и Г. Ланга (ФРГ) по оптимизации производственной установки. В расчетах принято давление 300 атм, расход технологического газа 187 000 нм³/ч с концентрацией дейтерия 0,0125%. Рекомендуется в качестве оптимального следующий температурный режим: для холодной колонны от -23 до -33° С, и для горячей колонки 60—80° С, величина соотношения потоков водорода и аммиака 5,4 ± 0,5. В области начального концентрирования рекомендуется строить каскады, имеющие не более двух-трех ступеней. Показано, что двухтемпературный каскад с исчерпыванием может обеспечить себестоимость порядка 43 долл/кг, а каскад с извлекающей колонкой и исчерпыванием — до 42 долл/кг. Установка такой же производительности, но использующая в качестве источника дейтерия воду с концентрацией дейтерия 0,015%, уравновешиваемую с водородом в присутствии NaOH в качестве катализатора, может обеспечить себестоимость производства D₂O около 45 долл/кг.

А. Банкрофт и Г. Рас (Канада) рассмотрели результаты исследования двухтемпературного изотопного обмена между аминами и водородом с целью концентрирования дейтерия. Расчеты показали, что малая скорость изотопного обмена между аммиаком и водородом в холодной колонне и высокая упругость пара аммиака в горячей колонне существенно влияют на себестоимость D₂O при двухтемпературном изотопном обмене в системе аммиак — водород. Как литературные данные, так и результаты исследований авторов показывают, что обмен водорода с алифатическими аминами протекает значительно быстрее, чем с аммиаком; в мономинах растворимость водорода выше, зато растворимость метиламида калия в аминометане меньше растворимости амида калия в аммиаке. Суммарное влияние перечисленных факторов приводит к большей скорости массообмена.

Из расчетов, выполненных в лаборатории, следует, что коэффициент разделения α в системе водород — аминометан близок к величине для системы аммиак — водород. В то же время упругость пара аминов намного меньше, чем аммиака. С учетом этих свойств капиталовложения могут быть снижены, по предварительной оценке, на 10—30% по сравнению с капиталовложениями в двухтемпературную аммиачную установку. В докладе приведена таблица, в которой сравниваются условия осуществления и основные расходные коэффициенты различных двухтемпературных процессов: сероводородного, аммиачного и с использованием аминов.

Интересно сообщение Б. Лефрансуа о заводе в Мазингарбе (Франция), где осуществлен одотемпературный обмен между аммиаком и водородом с обращением пото-

ков по обоим концам колонны изотопного обмена. Дано описание завода и подытоживается опыт работы первой в мире промышленной установки (20 т D₂O в год), использующей обмен в системе аммиак — водород.

Доклад К. Бимхата (Индия) освещает опыт эксплуатации установки низкотемпературной ректификации жидкого водорода — в Нангале. Основные трудности в работе установки, питаемой электролитическим водородом, связаны с забивкой отдельных частей аппаратуры твердым азотом. Подчеркивается возможность использования водорода с аммиачных установок производительностью до 1000 т NH₃ в сутки, а также возможность кооперации производства D₂O с производством гелия и жидкого параводорода, что может снизить стоимость производства D₂O. Доклад Г. Гутовского (ФРГ) также посвящен ректификации жидкого водорода с целью концентрирования дейтерия. На основе опыта эксплуатации установки производительностью 4 т D₂O в год разработан проект установки на 105 т D₂O в год, для которой сырьем является водород синтез-газа, поступающего с завода синтеза аммиака мощностью 1500 т NH₃ в сутки. Исходная азот-водородная смесь освобождается от CO₂ под давлением 25 атм с помощью промывки МЭА, в процессе охлаждения газа до 66° К выделяются другие примеси в твердом и жидком состояниях (~ до 2% N₂). Затем газ нагревают до 90° К и расширяют в детандере до 8 атм. При температуре 65° К газ поступает в регенераторы, охлаждается до 30° К, в результате чего оставшийся азот выделяется в твердой форме. Водород подогревается и дросселируется от 8 до 4,5 атм. Дана общая схема установки, которая может обеспечить производство 105 т D₂O в год стоимостью 21 долл/фунт.

В докладе А. Селецкого (Польша) рассматривается возможность обогащения природной воды методом ректификации до содержания D₂O 10% с применением оригинальной насадки «Польпак», что, по мнению автора, может обеспечить конкурентоспособность процесса.

В докладе С. Х. Руссела (Канада), посвященном экономике использования тяжелой воды в ядерных реакторах, рассматриваются пути использования тяжелой воды в ядерных реакторах в качестве замедлителя и теплоносителя, при этом учитывается ее относительно высокая стоимость. Рассматриваются также меры, обеспечивающие предотвращение потерь тяжелой воды, ее извлечение и обогащение. Показано, что при стоимости D₂O 50 долл/кг вклад этой стоимости в удельные капиталовложения АЭС составляет менее 45 долл/квт электроэнергии, вырабатываемой на станциях CANDU — PHW. Вклад стоимости D₂O в производимую при этом электроэнергию составляет 5·10⁻⁵ долл/квт·ч.

Авторы доклада «Некоторые соображения о двухцелевом двухтемпературном процессе производства D₂O» (П. Марчетти и Р. Симон, Италия), основываясь на идентичности температурного цикла двухтемпературной установки по производству D₂O и температурного цикла работающих на газовом топливе электростанций с закрытым циклом, приходят к выводу о возможности получения электроэнергии за счет работы двухтемпературной установки, производящей D₂O при обмене между водородом и водой. Авторы рассматривают каскад, состоящий из единичных ступеней обмена и обогащающий воду по дейтерию в 100 раз. По их расчетам, в таком каскаде можно генерировать в виде электроэнергии почти 40% того общего коли-

чества тепловой энергии, которое вводится в установку. По оценке авторов, при стоимости D_2O порядка 40 долл/кг стоимость получаемой таким образом электроэнергии может составить примерно 0,001 долл/квт·ч.

Материалы сборника отражают современное состояние технологии тяжелой воды за рубежом и представляют интерес для специалистов.

Я. Д. ЗЕЛЬВЕНСКИЙ, С. Г. КАТАЛЬНИКОВ

VIII Международная конференция по ускорителям высоких энергий

На конференции, которая проходила в Женеве 20—24 сентября 1971 г., обсуждались результаты последних исследований, связанные с разработкой и улучшением ускорительных установок и комплексов для получения встречных пучков частиц. Результаты этих исследований были изложены в 120 докладах, из них 31 сообщение поступило от исследовательских центров СССР.

Все представленные проекты как протонных, так и электронных ускорителей базируются на жесткофокусирующих структурах магнитного поля (как правило, с разделенными функциями поворота и фокусировки) с использованием обычных или сверхпроводящих магнитов. На этой же основе создается большинство проектов ускорительных и накопительных систем для вторичных пучков (см. таблицу).

В лабораториях интенсивно ведутся исследовательские работы по сверхпроводящим импульсным магнитам с полями 4—6 тл. Основное направление этих исследований — снижение мощности низкотемпературных потерь на погонном метре магнита. С целью уменьшения потерь для импульсных магнитов разработаны специальные сверхпроводящие кабели с толщиной сверхпроводящих нитей 4—10 мк. Предельная индукция также лимитируется мощностью потерь, которые растут быстрее квадрата индукции. С проблемой мощности потерь связан выбор продолжительности цикла ускорения (скорость увеличения индукции). Установлено, что при уменьшении продолжительности цикла от 40 до 10 сек низкотемпературные потери в различных конструкциях (железо внутри или вне охлаждаемого

объема) возрастают в 5—20 раз. Потери при цикле 40 сек составляют 5—8 вт/м.

Среди проектов линейных ускорителей на высокие энергии заслуживает внимания проект удвоения энергии электронного пучка Станфордского линейного ускорителя на 20 Гэв (США) с одновременным уменьшением макроскважности пучка на два порядка. Проект включает накопительную систему протяженностью 6,8 км, расположенную вдоль линейного ускорителя, с двумя петлями на концах. Для компенсации энергетических потерь на излучение в петлях предусмотрены два сверхпроводящих резонатора.

Исследованиями по сверхпроводящим резонаторам, предназначенным для ускорителей заряженных частиц, на конференции было представлено большое число докладов. Однако, несмотря на большой объем проведенных в этом направлении научно-исследовательских работ, имеется ряд трудностей, осложняющих эксплуатацию таких результатов и получение характерных для них напряженностей электрического поля. К числу таких трудностей относятся старение материала (неповторяемость результатов измерений после соприкосновения с атмосферным давлением поверхностей резонаторов), резкая зависимость добротности от пикового значения напряженности электрического поля и радиационной «деформации» поверхностей.

Эти эффекты в случае ниобиевых резонаторов приводят к уменьшению добротности на порядок при изменении напряженности от 4 до 30 Мв/м или при облучении потоком нейтронов 10^{15} см⁻². В области напряженностей выше 30 Мв/м возникает электронная

Основные параметры кольцевых ускорителей на высокие энергии ($E \geq 25$ Гэв)

Институт, страна	Частицы	Конечная энергия, Гэв	Число частиц в импульсе	Частота повторения, гц	Запуск	Оценка стоимости	Примечание *
ЦЕРН, Швейцария	p	300	$2 \cdot 10^{12}$	0,23	1976	1150 млн. шв. франков	Увеличение энергии до 1000 Гэв
США	p	200	$5 \cdot 10^{13}$	0,25	1972	250 млн. долл.	Увеличение энергии до 500 Гэв
ИФВЭ, СССР	p	70	$2 \cdot 10^{12}$	0,18	1967	120 млн. руб.	Увеличение интенсивности до $5 \cdot 10^{13}$ p/имп
США	p	33	$2 \cdot 10^{12}$	0,5	1960	31 млн. долл.	
ЦЕРН, Швейцария	p	28	$2 \cdot 10^{12}$	0,5	1959	200 млн. шв. франков	Увеличение интенсивности до 10^{13} p/имп

* В таблице приведены данные для первого этапа сооружения, в примечании указаны результаты, которые предполагают получить на втором этапе.