

быстрое развитие обусловленных конечной проводимостью неустойчивостей в плазме тэтатронов во время захвата в плазме первоначального магнитного поля.

В Мюнхене и Гархинге теоретически, а в Сакле экспериментально изучаются мелкомасштабные неустойчивости плазмы в ловушках с магнитными пробками, в частности ионная циклотронная неустойчивость.

В Стокгольме и Амстердаме изучается метод нагрева плазмы путем придания ей макроскопического вращения с последующей диссипацией энергии этого вращения в плазме.

Другие исследования. В некоторых лабораториях исследуются различные методы накопления плазмы в магнитных ловушках: инжекция ионов, инжекция сгустков плазмы, инжекция нейтральных атомов. В магнитную ловушку «Феникс» инжектируется пучок нейтральных атомов с энергией 20 кэв. Используется лоренцевская ионизация атомов в магнитном поле ловушки. Достигнута плотность плазмы 10^9 см^{-3} .

В Мюнхене экспериментально изучался тороидальный дрейф плазмы. В установке «M + S» гофрировка магнитного поля позволила удлинить время существования плазмы, ограничиваемое тороидальным дрейфом, в три раза.

В установке «Мираш» в цилиндрическую вакуумную камеру вдвигается тонкий цилиндрический слой порошка AlLiD_4 . Мощная ультрафиолетовая лампа-вспышка производит начальную ионизацию. Затем к торцам цилиндра прикладывается высокое напряжение и происходит быстрое схлопывание цилиндрического слоя плазмы. Достигнута максимальная плотность плазмы 10^{19} см^{-3} .

В Гархинге подготавливается опыт по нагреву плазмы путем инжекции в нее пучка ионов с энергией 300 кэв (ток пучка 0,5 а).

ИССЛЕДОВАНИЯ В ЯПОНИИ И АВСТРАЛИИ

Как сообщается в докладе Уотсона-Манро, исследования по программе управляемого термоядерного синтеза проводятся в Сиднейском университете в Австралии (установка SUPPER — источник плазмы с плотностью $10^{13} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и температурой 1 эв, генератор ВЧ-колебаний мощностью 1 Мвт на частоте 9 Мгц для исследования циклотронного резонанса в плазме; тороидальная установка для динамической стабилизации плазмы вращающимся полем; установки для исследования волн в плазме) и в нескольких исследовательских центрах Японии (университеты в Нагое, Киото, Токио, Нихоне, Осаке, Тохуку, Национальная электротехническая лаборатория, компания «Токио шибара электрик» и др.). Небольшие эксперименты проводятся в странах Африки и Латинской Америки. В Индии сделан ряд теоретических исследований по физике плазмы.

В Японии большое внимание уделяется тороидальным ловушкам, исследуются тороидальная ловушка с гофрированным полем «Гелиотрон» (Киото), тороидальная ловушка с «волнистым» полем (Токио), плазменный бетатрон (Токио), стелларатор с ВЧ-нагревом плазмы (Осака). Исследуются также ловушки с магнитными пробками: установка «НХ» с инжекцией молекулярных ионов в пробкотрон (Осака), установка с магнитным полем остроконечной конфигурации под названием «Химера» (Осака), установка по исследованию диффузии плазмы поперек магнитного поля (Токио).

В некоторых лабораториях ведутся работы на тэтатронах, причем в Нихоне найден режим устойчивого сжатия плазмы медленно нарастающим полем ($H_{\text{макс}} = 8 \text{ кэс}$, полупериод колебаний поля 31 мксек). Имеются установки по исследованию трубчатого самосжатого разряда (Национальная электротехническая лаборатория) и многоступенчатого адиабатического сжатия плазмы (Нагоя, Нихон).

Большой размах имеют эксперименты по прохождению волн и циклотронному резонансу в холодной плазме, которые проводятся на установке «QP» (Нагоя), представляющей собой пеннинговский источник чистой плазмы с плотностью $10^{11} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и температурой 1 эв, и на установке «AWRA-2» (Тохуку) для наблюдения резонансного поглощения сильных альфвеновских волн. Получены интересные экспериментальные и теоретические результаты.

В целом обзор термоядерных исследований на конференции показал, что эти исследования широко развиваются во всем мире и уже фактически превратились в самостоятельную отрасль науки.

Все участники обсуждения единодушно отмечали, что в период между конференциями в рассматриваемой области достигнут весьма значительный прогресс. Одним из важнейших достижений было признано открытие методов подавления крупномасштабных магнитогидродинамических неустойчивостей плазмы и, в частности, экспериментальная разработка советскими исследователями ловушек с комбинированными магнитными полями.

Однако выполненные за последние годы глубокие экспериментальные и теоретические исследования вскрыли и новые трудности осуществления управляемой термоядерной реакции, для преодоления которых потребуются еще годы напряженной исследовательской работы. Сейчас на эти исследования, по словам председателя английской комиссии по атомной энергии У. Пенни, ежегодно расходуется во всем мире не менее 100 млн. долл. Притом, как подчеркивали многие выступавшие, задача освоения энергии управляемого термоядерного синтеза настолько важна для будущего человечества, что вполне оправдывает затрачиваемые огромные средства и усилия.

Изотопы и излучения

А. С. Штань

Третья международная конференция по применению атомной энергии в мирных целях была посвящена в основном ядерной энергетике и реакторостроению. Тем не менее были рассмотрены также интересные вопросы в области производства и применения изотопов*.

* Перечень докладов советских ученых опубликован в «Атомной энергии», 17, вып. 3, 235 (1964), а спи-

сок докладов зарубежных ученых в «Атомной технике за рубежом», № 8, 27 (1964).

** В круглых скобках указаны номера докладов.

отдельных осколочных изотопов и изотопов, получаемых нейтронным облучением в реакторах. Основными побуждающими мотивами для постановки этих работ являются осуществление программы создания небольших электрических силовых установок (программа SNAP)*, в которых энергия, выделяемая в процессе радиоактивного распада, преобразовывается в электрическую, а также программы развития работ в области радиационной химии и радиационной обработки пищевых продуктов.

За период с 1961 по 1964 г. в США было произведено изотопа Sr⁹⁰ 5 млн. *кюри*; изотоп был переведен в соединение SrTiO₃ — керамику, обладающую хорошей термической стабильностью, радиационной стойкостью, высоким содержанием стронция и сравнительно низкой растворимостью в воде.

В работах по радиационной химии и радиационной обработке пищевых продуктов находят применение источники излучения из Cs¹³⁷. В январе 1964 г. в Ок-Риджской национальной лаборатории был изготовлен источник из Cs¹³⁷ активностью 215 тыс. *кюри*. К концу 1964 г. в США было выделено около 1 млн. *кюри* Cs¹³⁷, который был получен вымыванием цезиевой фракции из неорганического раствора и последующей доочисткой с применением квасцового кристаллизационного процесса.

С целью увеличения производства изотопов, получаемых из продуктов деления, разработан проект нового завода — Ханфордского завода по производству изотопов. Сравнительные данные о стоимости изотопной продукции на этом заводе в зависимости от объемов производства приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительные данные стоимости некоторых радиоактивных изотопов в зависимости от объемов производства (252) [1]

Изотоп	1964 — 1966 гг.		1967 — 1968 гг.	
	ежегодный выпуск, млн. <i>кюри</i>	стоимость, долл./ <i>кюри</i>	ежегодный выпуск, млн. <i>кюри</i>	стоимость, долл./ <i>кюри</i>
Sr ⁹⁰	3—5	1—1,5	10	0,13—0,26
Cs ¹³⁷	1—3,5	0,8	10	0,1—0,23
Pm ¹⁴⁷	0,3	0,75	30	0,03—0,09
Ce ¹⁴⁴	—	—	100	0,01—0,02

Предполагается, что установки по выделению осколочных изотопов из продуктов деления будут построены в 1967 г., а установки по очистке и упаковке — к 1968 г.

Из изотопов, получаемых нейтронным облучением, большой интерес для «изотопной энергетики» представляет Pu²³⁸. Для получения этого изотопа в США работают три производственные установки, а также одна лаборатория; он производится в килограммовых количествах путем облучения Np²³⁷, который, в свою очередь, образуется при облучении U²³⁸ (реакция $n, 2n$) и U²³⁵ (реакция $2n, \gamma$).

Привлекают внимание изотопы кюрия, которые являются составляющими цепочки, ведущей к обра-

зованию самых тяжелых элементов, в частности калифорния, а также могут служить источниками тепла в изотопных источниках тока. В США завершена программа облучения 10 кг Pu²³⁹, в результате чего получено около 400 г Cm²⁴⁴; предполагается соорудить установки для получения Cm²⁴⁴ в килограммовых количествах. Этот изотоп представляет особый интерес из-за его чрезвычайно подходящих характеристик для изготовления тепловых блоков изотопных источников тока: период полураспада 18 лет, удельное выделение тепловой энергии в три раза выше, чем у других изотопов с большим периодом полураспада. Благодаря высокому удельному выделению энергии Cm²⁴⁴ может быть использован при термоэлектронном методе преобразования, с помощью которого, как ожидается, превращение тепла в электричество будет примерно вдвое эффективнее, чем при термоэлектрическом методе преобразования. Показано, что стоимость получения относительно чистого Cm²⁴⁴ в значительных количествах может составить 1000—2000 *доллар*г.

Для облучения мишеней потоком нейтронов свыше 10^{15} нейтрон/(см² · сек) в 1965 г. будет завершено строительство специального реактора. Продуктами облучения будут граммовые количества Cf²⁵². Ведутся работы по получению Cm²⁴², который представляет интерес главным образом как источник тепла в «изотопной энергетике». Этот изотоп получают из Am²⁴¹, который, в свою очередь, образуется в результате β -распада Pu²⁴¹. Получены килограммовые количества Am²⁴¹, из которого нейтронным облучением получают необходимые количества Cm²⁴².

Изотопные источники тока. Получение электрической энергии путем прямого преобразования энергии радиоактивного распада — одно из основных направлений применения больших количеств радиоактивных материалов, получаемых из продуктов деления ядерного горючего или в результате нейтронного облучения в реакторах соответствующих мишеней.

На конференцию было представлено два доклада, посвященных этому вопросу (217, 318). Программа работ по изотопным источникам тока в США (программа SNAP) осуществляется с 1956 г. (табл. 2—5). Из табл. 2 следует, что вероятная потребность в электрических источниках энергии для космических целей на 1964—1967 гг. составляет около 20 *квт*; потребность в электрических генераторах мощностью менее 1 *квт* после 1967 г. составит ~ 5 *квт/год*. Крупные потенциальные области наземного применения изотопных источников тока могут потребовать на 1964—1967 гг. 20 *квт*.

Начаты исследования возможности применения радиоактивных изотопов в качестве источников энергии для небольших ракетных двигателей (196). Рассматриваются три возможности:

- 1) тепло, образующееся в результате радиоактивного распада, употребляется на повышение температуры двигательного газа прямым конвекционным переносом тепла;
- 2) тепло используется для термоактивирования катализатора, который ускоряет разложение гидразинового топлива;
- 3) тепло используется для нагрева стенок рабочих каналов и повышения температуры двигательного газа. Ракетные двигатели такого типа должны отличаться высоким удельным импульсом, но низкой тягой и поэтому могут быть использованы в верхних ступенях небольших непилотируемых космических кораблей при межпланетных полетах или при переходе от низкой земной орбиты на более высокую орбиту по траектории, требующей минимальной затраты энергии.

* An evaluation of Systems for Nuclear Auxiliary Power. TID-20079, USAEC, 1964.

Таблица 2

Предполагаемые потребности в электрической энергии для космических целей

Область применения	Наименование спутника, станции или проекта	Примерная мощность, <i>вт</i>	Число спутников в год			
			1964 г.	1965 г.	1966 г.	1967 г.
Астрономия	Астрономические обсерватории на спутниках	500	—	1	2	1
Физика солнца	Солнечные обсерватории на спутниках	25	2	1	2	1
	Усовершенствованные OSO	15—50	—	—	—	2
Геофизика и геодезия	Геофизические обсерватории на спутниках	500	1	3	4	3
	Эксплорер	15—50	1	3	1	2
	Монитор — межпланетные исследовательские станции	40	1	3	2	2
	Международный	15—50	7	5	6	4
	Геодезический спутник «Анна»	50	—	3	2	1
Биофизика	Биологические спутники	25	—	1	4	1
Исследование луны	«Рейнджер» (ударного типа)	150—190	4	—	—	—
	«Сервейер» (для прилунения)	15—25 *	—	5	2	—
	«Сервейер» (для вывода на орбиту)	125	—	—	4	3
Исследование планет и межпланетного пространства	«Маринер» (Марс и Венера)	150—250	2	—	4	2
	«Пионер»	5—100	—	3	3	1
Метеорология	«Тирос»	25—50	1	—	—	—
	«Нимбус»	140—250	1	1	1	1
Связь	«Телстар»	60	1	12	10	8
	«Рилэй»	50	2	—	—	—
	«Синком»	45—100	1	1	2	—
Военно-оборонное применение спутников	Спутники связи для средней высоты	25	—	—	—	—
	Спутники связи «Синком»	100	—	—	—	—
	Морские навигационные спутники	25	—	—	—	—

* Мощность после прилунения, мощность в пути 100 *вт*.

Таблица 3

Возможное наземное применение изотопных систем

Применение	Примерная мощность генератора, <i>вт</i>	Предполагаемые потребности на 1964—1967 гг.	
		число генераторов	суммарная мощность, <i>вт</i>
Навигационное назначение (ВМФ)	10	—	—
Противолодочная военная береговая служба (ВМФ)	150	—	—
Океанографические и метеорологические приборы (по заказу ASN и ВМФ)	20	—	—
Ракетные системы (ВВС)	100	—	—
Метеорологические станции	20—60	50	1000—3000
Береговые маяки на Аляске и Алеутских островах	5—15	70	350—1050
Плавучие маяки (Аляска)	10	70	700
Нефтяные скважины Мексиканского залива	50	100	5000
Радиомаяки	5—100	20	100—2000
Автоматические сейсмические станции	60	10—1000	600—6000
Приборы для обнаружения подводных взрывов ракет и устройства для слежения за движением кораблей	10	260	2600

Таблица 4

Характеристики изотопных генераторов тока для космических целей

Генератор	Мощность установки в конце срока службы, <i>вт</i>	Срок службы, лет	Горючее	Параметры в конце срока службы			Поверхность излучателя, m^2		Размеры, <i>см</i>		Дата ввода в действие	Объект использования
				напряжение, <i>в</i>	сила тока, <i>а</i>	внешняя нагрузка, <i>ом</i>	оребрение	корпус	длина	диаметр		
SNAP-3	2,7	5	Pu ²³⁸	2,7	1,0	3,0	Нет	0,055	13,97	12,19	1961	ДОД-спутник
SNAP-9A	25,0	6	Pu ²³⁸	6,4	4,6	2,0	0,193	0,154	24,13	50,80	1963	ДОД-спутник
SNAP-11	18,6—25	1/4	Cm ²⁴²	3,0	8,33	0,42	0,093	0,151	27,94	45,72	1965	Спутник «Сервейер»
SNAP-17	25,0	5	Sr ⁹⁰	6,6	3,8	1,75	0,121	0,140	31,75	16,76	1965	Спутник связи
SNAP-19	22,0	3	Pu ²³⁸	4,75	4,65	1,02	0,095	0,094	24,76	13,56	1965	Межпланетный зонд
Без названия	6—10	1	Pu ²³⁸ или Sr ⁹⁰	—	—	—	—	—	—	—	—	Легкий демонстрационный прибор

Таблица 5

Характеристики наземных изотопных генераторов тока

Генератор	Мощность установки, <i>вт</i>	Срок службы, лет	Горючее		Вес, <i>кг</i>	Длина, <i>см</i>	Диаметр, <i>см</i>	Дата ввода в действие	Назначение или объект использования
			вид	количество					
SNAP-3	25	1/4	Po ²¹⁰	2	1,8	13,97	12,19	1959	Проверка принципа действия
Без назначения	4,5	2 мин	Sr ⁹⁰	18	~760	50,80	45,72	1961	Метеостанция «Аксел-Хейберг»
								1962	Навигационный буй
SNAP-7A	10	10	Sr ⁹⁰	40	~850	53,34	50,80	1962	Метеостанция «Антарктида»
SNAP-7C								1963	Маяк
SNAP-7B	60	10	Sr ⁹⁰	225	~2100	87,63	55,88	1964	Плавающая метеостанция
SNAP-7D								1964	Подводный буй
SNAP-7E	6,5	40	Sr ⁹⁰	31	~3600**	162,54	80,01	1964	Система контроля
SNAP-15A *	0,001	4	Pu ²³⁸	22	0,45	12,70	6,35	1965	Система контроля
SNAP-15B *	0,001	4	Pu ²³⁸	22	0,45	8,92	7,62	1965	Система контроля
SNAP-21 *	10	5	Sr ⁹⁰	—	—	—	—	1965	Глубоководный генератор

* Предварительная конструкция.

** Специальный сосуд для установки в глубине океана, выдерживающий большие давления.

Радиационные процессы и технология. Характерной особенностью представленных на конференцию докладов, посвященных этой проблеме, является технико-экономический подход к вопросу промышленной реализации радиационных процессов и дифференцированный подбор источников излучения для осуществления этих процессов.

Показатели технологической организации процессов и их экономической эффективности являются опре-

деляющими при решении вопроса о промышленной реализации того или иного радиационного процесса. Так, например, сообщается (198), что объем реализованных процессов в США в настоящее время оценивается в 70 млн. долл. и быстро возрастает (табл. 6).

В ближайшем будущем могут быть использованы в промышленности следующие радиационные процессы: полимеризация древесно-пластикатных материалов; облучение продуктов питания (дезинсекция пшеницы

Таблица 6

Процессы и объем производства

Процесс	Источник излучения	Объем производства в год
Сшивка полиэтиленовых изделий (труб, изоляций и т. п.)	Ускоритель	27 млн. долл.
Сшивка полиэтиленовых пленок	»	4500 T
Облучение полупроводниковых деталей и схем	»	2.10 ⁷ шт
Производство этилбромид	Co ⁶⁰	400 T
Стерилизация	Ускоритель и Co ⁶⁰	28 млн. долл.

и пшеничных продуктов, стерилизация бекона в жестяных консервных банках); облучение полупроводниковых устройств с целью улучшения их свойств; радиационное получение биологически окисляемых моющих средств; полимеризация этилена и сополимеров и другие процессы.

Работы в области хемоядерного синтеза находятся пока еще в исследовательской стадии. Разрабатываются хемоядерные процессы синтеза гидразина, NO₂, озона, радиационно-термического крекинга (РТК) нефтепродуктов и углеводородных газов с использованием осколков деления и реакторных излучений (292, 389).

Обсуждаются возможные типы реакторов для осуществления радиационно-химических процессов (542).

Применение изотопов и источников излучения в гидрологии и гидрогеологии*

Н. В. Чураев, А. И. Яковлев, М. П. Волорович,
Н. Я. Флексер, С. Я. Вартазаров

Радиоактивные изотопы широко применяются в гидрологии и гидрогеологии для исследования открытых водных потоков, грунтового потока, миграции наносов и водного режима почв и грунтов, а также для решения многих инженерных задач.

В отличие от красителей и солей радиоактивные индикаторы, при соответствующем выборе, мало поглощаются грунтами и используются при более низкой концентрации, благодаря чему не изменяются ни свойства фильтрующейся жидкости, ни свойства грунта. Концентрация радиоактивного индикатора определяется с высокой точностью при помощи сравнительно несложной аппаратуры, причем окраска и засоленность воды практически не влияют на точность измерений.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ГРУНТОВЫХ ПОТОКОВ

Анализ сорбционных свойств грунтов показывает, что наиболее подходящими радиоактивными индикаторами являются J¹³¹ в соединениях NaJ или KJ, хелатные соединения с Co⁶⁰, а также S³⁵ в виде раствора соли Na₂SO₄. Широкое применение в гидрогеологических исследованиях находит меченая вода T₂O, D₂O.

Повышение точности измерений расхода и скорости грунтового потока в результате применения радиоактивных индикаторов привело к необходимости уточнения некоторых расчетных формул, применявшихся для индикаторных методов. Первый из применяющихся методов [1] основан на наблюдениях за изменением концентрации индикатора, введенного в скважину. Расчетное уравнение для расхода установившегося грунтового потока q имеет при этом следующий вид:

Отмечается возможность применения для активационного анализа Am²⁴¹—Ве-источников нейтронов, имеющих преимущества по сравнению с Рb²¹⁰—Ве- и Рu²³⁹—Ве-источниками. Широкое применение небольших нейтронных генераторов в сочетании с совершенной малогабаритной транзисторной электронной аппаратурой позволяет сделать этот метод промышленным; в настоящее время он может эффективно конкурировать с другими методами элементного анализа в определенном диапазоне концентраций. Генераторы, дающие поток нейтронов 10⁹—10¹¹ нейтрон/сек с энергией 14 Мэв, эффективно используются для экспрессного анализа элементного состава образцов в тех случаях, когда химические методы требуют существенно больших затрат времени или обладают меньшей чувствительностью.

Значительное внимание уделяется такому важному вопросу, как увеличение срока службы тритиевой мишени, которое достигается применением радиоактивных ионных источников и другими способами (497).

В некоторых докладах (197, 829, 854) сообщается о новых областях применения активационного анализа: в криминалистике, исследованиях космического пространства, для определения солевого состава озер и т. д.

где W_0 — объем воды в скважине; C_0 — начальная концентрация индикатора; C — концентрация ко времени τ . Экспериментальная проверка этой зависимости была проведена с помощью радиоактивных индикаторов в фильтрационных трубках и грунтовых лотках. Сравнение результатов измерений расхода объемным методом на сливе и по уравнению (1) показало, что

$$q = \frac{W_0}{K\tau} \ln \frac{C_0}{C}, \quad (1)$$

* Подготовлено для Третьей международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1964.