

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

**В.М. Жданов**

## **ТАЙНЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ**

*Рекомендовано к изданию*

*УМО «Ядерные физика и технологии»*

Москва 2011

УДК 621.039.3  
ББК 24.12  
Ж 42

Жданов В.М. **ТАЙНЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ.** М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – 224 с.

В книге рассказывается об истории открытия изотопов химических элементов, о роли изотопов в овладении атомной энергией, об основных методах разделения изотопов. Особое внимание уделяется истории разработок методов и промышленных установок по разделению изотопов урана (как в рамках Манхэттенского проекта США, так и Советского атомного проекта) в связи с открывшимися и опубликованными в последние годы материалами.

Значительная часть книги посвящена популярному изложению физических основ молекулярно-кинетических методов разделения изотопов. Автор надеется, что это позволит лучше понять, какими конкретными представлениями и идеями руководствовались ученые, технологи конструкторы и инженеры, которым пришлось развивать эти методы и доводить их до практического воплощения. Именно благодаря их усилиям в нашей стране и ряде других развитых стран мира была создана современная разделительная промышленность по производству изотопов, которая представляет собой поистине новую наукоемкую технологию XXI века.

Научно-популярное издание предназначено для преподавателей, учащихся старших классов средней школы и лицеев с техническим уклоном, а также студентов первых курсов технических вузов, интересующихся развитием атомной науки и техники. Книга может оказаться также полезной в качестве начального пособия для студентов, обучающихся по специальности «Физика кинетических явлений».

Подготовлено в рамках Программы создания и развития НИЯУ МИФИ.

Рецензент д-р физ.-мат. наук, проф. В.Д. Борман (НИЯУ МИФИ)

*ISBN 978-5-7262-1510-5*

© *Национальный исследовательский  
ядерный университет «МИФИ», 2011*

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	5
Изотопы — что это такое?	
О чем эта книга?	
<b>Глава 1 Открытие изотопов</b> .....	13
Загадки атомного веса	
Периодическая система элементов	
Пятилетие открытий	
Радиоактивность и ядерная модель атома	
Открытие изотопов	
Параболы Томсона	
Опыты Астона	
Масс-спектрометры Астона и Демпстера	
Изотопы водорода и тяжелая вода	
<b>Глава 2. Изотопы урана и овладение атомной энергией</b> .....	49
Ядерная алхимия	
Энергия ядерных превращений	
Открытие деления урана. Цепная реакция	
Изотопы урана	
Два пути использования энергии деления ядер	
<b>Глава 3. Урановая проблема</b> .....	67
Покров секретности	
Немецкий атомный проект	
Усилия британских ученых	
Начало работ в СССР	
Манхэттенский проект	
Кухонное сито и разделение изотопов	
Первый американский газодиффузионный завод	
Электромагнитные монстры	
Атомные взрывы над Японией	
<b>Глава 4. Советский атомный проект</b> .....	91
Как это начиналось	
Выбор пути	
Успехи и неудачи	
Создание газодиффузионного производства в СССР	
Установки электромагнитного разделения	

А центрифуги – лучше	
Первые центрифуги Ланге и Штеенбека	
Впереди планеты всей	
Проблема получения тяжелой воды	
Водородная бомба и дейтерид лития	
Изотопы и «термояд»	
<b>Глава 5. Современные разделительные производства</b> .....	123
Обогащение урана в России и в мире	
Новые возможности центрифуг	
<b>Глава 6. Немного теории разделения</b> .....	137
Коэффициенты разделения и обогащения	
Разделительный каскад	
Что такое ЕРР?	
<b>Глава 7. Элементы кинетической теории газов</b> .....	151
Закон квадратного корня	
Основные понятия кинетической теории газов	
Поток газа в капилляре и пористой среде	
Диффузия в газовой смеси	
<b>Глава 8. Газодиффузионный метод разделения изотопов</b> ....	175
Проницаемость пористого фильтра	
Эффект разделения	
Диффузия в переходной области давлений	
Делитель	
<b>Глава 9. Термодиффузионная и масс - диффузионная</b>	
<b>колоны</b> .....	193
Термическая диффузия в газовой смеси	
Эффект разделения.	
Термодиффузионная колонна	
Эффект разделения при масс - диффузии	
Масс - диффузионная колонна	
<b>Глава 10. Центробежный метод разделения</b> .....	207
Немного истории	
Центрифуга. Физика явлений	
Эффект разделения	
<b>Заключение</b> .....	218
<b>Список литературы</b> .....	221

## ВВЕДЕНИЕ

### Изотопы, что это такое?

Название “*изотопы*“ было предложено в 1913 году английским радиохимиком Фредериком Содди, одним из ближайших сотрудников Эрнеста Резерфорда, для того чтобы отличать друг от друга разновидности одного и того же химического элемента, которые как близнецы-братья похожи по своим физико-химическим свойствам, но имеют разную атомную массу. Содди образовал это понятие из двух греческих слов: *isos* - одинаковый и *topos* - место. Это означало, что изотопы занимают одно и то же место в клетке периодической системы элементов Менделеева. Так понятие *изотопы* вошло в обиход ученых и стало таким же неотъемлемым достоянием науки 20-го века, как слова *радиоактивность*, *атомное ядро*, *квант*, *нуклон* и т.п.

Все вещества в окружающей нас природе образованы из сравнительно небольшого числа химических элементов. Почти за сто лет до открытия изотопов Джон Дальтон определил *элемент* как *вещество, состоящее из атомов одного вида*. Атомы различных химических элементов отличаются своими *относительными атомными весами* или *атомными массам*<sup>1</sup>.

В самом звучании слова “элемент” мы обнаруживаем последовательность трех букв латинского алфавита: *l, m, n*. Заслуга в установлении своеобразной азбуки элементов принадлежит Дмитрию Ивановичу Менделееву. Любому образованному человеку знакома связанная с его именем *периодическая система*

---

<sup>1</sup> Разумеется, правильным было бы употребление везде современного понятия “атомная масса”. Словосочетание “атомный вес элемента” мы будем иногда использовать, лишь следуя исторической традиции.

элементов. Появившись в 1869 году, она внесла ясность в накопленную к тому времени сумму знаний о химических элементах, имеющихся в природе. Расставив их по клеткам (в порядке возрастания атомного веса) и обнаружив периодическую повторяемость их свойств, Менделеев фактически исключил тем самым возможность существования каких-то еще промежуточных химических элементов, а для пустующих клеток предсказал возможность открытия новых, еще не найденных. Выяснилось, что в целом химики располагают ограниченным набором элементов, т.е. определенным числом (менее 100) различных сортов атомов. Именно этот набор дал возможность природе, а затем и человеку “построить” огромное число разнообразных химических соединений путем объединения имеющихся атомов в молекулы.

Дальнейшее развитие науки, особенно атомной физики, и установление электронной структуры атома позволили дать надежное обоснование периодической системе элементов и наполнить ее новым физическим содержанием.

Как известно, любой атом состоит из положительно заряженного ядра и окружающего его облака отрицательно заряженных электронов. Поскольку атом в целом электрически нейтрален, заряд ядра равен по величине суммарному заряду окружающих его электронов. В атомной физике зарядом ядра фактически принято называть зарядовое число  $Z$  или кратность заряда (по числу элементарных электрических зарядов  $e$ , образующих истинный положительный заряд ядра). Очевидно, число  $Z$  равно числу электронов в атоме, и именно этим числом определяется положение химического элемента в таблице Менделеева (его порядковый номер). Таким образом, более точное определение понятия химического элемента гласит: *элемент — это вещество, состоящее из атомов с одинаковым зарядом ядра*. Проясняется и определение изотопов: *изотопы — это разновидности одного и того же химического элемента, атомы которых имеют одинаковый заряд ядра (и, следовательно, практически одинаковые электронные оболочки), но отличаются значениями массы ядра*. По образному выражению Ф.Содди, “атомы изотопов одинаковы *снаружи*, но различны *внутри*”.

В 1932 году был открыт *нейтрон* — частица, не имеющая заряда и с массой, близкой к массе ядра атома водорода — *протона*. После создания в том же году протонно-нейтронной модели ядра в атомной физике установилось окончательное современное определение понятия изотопов: *изотопы* — это вещества, ядра атомов которых состоят из одинакового числа протонов и отличаются лишь числом нейтронов. Следует заметить что под термином *изотоп* часто подразумевают и сами ядра атомов химических элементов — *нуклиды*, образованные из *нуклонов* (т.е. протонов и нейтронов).

В настоящее время каждый изотоп принято обозначать набором символов  ${}^A_Z X$ , где  $X$  — символ химического элемента,  $Z$  — заряд ядра атома или его атомный номер,  $A$  — массовое число изотопа (общее число нуклонов — протонов и нейтронов в ядре,  $A=Z+N$ ). Поскольку заряд ядра определяет место элемента в периодической системе и оказывается однозначно связанным с символом химического элемента, иногда для сокращения используется просто символическое обозначение  ${}^A X$ , которым мы будем часто пользоваться в дальнейшем.

Заметим, что из всех изотопов только изотопы водорода имеют собственные названия. Так изотопы  ${}^2\text{H}$  и  ${}^3\text{H}$  носят названия *дейтерия* и *трития* и получили обозначения соответственно  $\text{D}$  и  $\text{T}$  (изотоп  ${}^1\text{H}$  называют иногда *протием*).

С открытием явления радиоактивности выяснилось, что в природе встречаются как *стабильные изотопы*, так и *нестабильные* или *радиоактивные*, ядра атомов которых подвержены самопроизвольному превращению в другие ядра с испусканием различных частиц и электромагнитного излучения (или процессам так называемого радиоактивного распада). В настоящее время известно 287 стабильных изотопов, причем стабильные изотопы встречаются только у элементов с атомным номером  $Z \leq 83$ . Что касается нестабильных изотопов, то их число превышает две тысячи. Некоторые из них, например, изотопы урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$  и  ${}^{235}_{92}\text{U}$ , хотя и подвержены радиоактивному

распаду, имеют чрезвычайно большие времена полураспада ( $4,5 \cdot 10^9$  лет для  $^{238}\text{U}$  и  $7,0 \cdot 10^8$  лет для  $^{235}\text{U}$ ), т.е. относятся к разряду долгоживущих.

Подавляющее большинство нестабильных изотопов получено искусственным путем в результате осуществления различных ядерных реакций. Число радиоактивных изотопов у многих элементов весьма велико и может превышать два десятка. Так, у урана сейчас известны еще 16 изотопов. Число стабильных изотопов существенно меньше, причем ученые установили интересную особенность: наибольшее разнообразие изотопов имеют элементы, у которых  $Z$  является четным числом. Элементы, у которых  $Z$  нечетно, имеют, как правило, не более двух стабильных изотопов, у некоторых стабильны только один. Из 82 элементов 21 – *моноизотопны*, т.е. состоят из одного вида атомов и не имеют второго стабильного изотопа. Среди них бериллий, фтор, натрий, алюминий, фосфор, кобальт, марганец, золото и ряд других элементов. Наибольшее число стабильных изотопов – 10 обнаружено у олова, у инертного газа ксенона их 9, у бария и ртути 7, у хрома и железа 4.

## **О чем эта книга?**

Из названия книги следует, что она посвящена проблеме *разделения изотопов*. Если быть более точным, то мы расскажем в ней о наиболее известных *методах разделения стабильных и долгоживущих изотопов*. Основное внимание будет уделено при этом так называемым *молекулярно-кинетическим методам разделения* (методы газовой диффузии, термодиффузии, масс-диффузии и центрифугирования). Метод газовой диффузии и особенно центробежный метод составляют главную основу существующих сейчас в мире разделительных производств. К сожалению, лишь в малой степени придется коснуться существа *физико-химических методов* разделения (ректификация, изотопный обмен и др.), которые широко используются для разделения изотопов водорода и ряда других легких элементов. Это связано со спецификой физико-химических процессов в них, обсуждение

которых заняло бы много места. Мы практически не касаемся здесь и имеющей хорошую перспективу *лазерных и плазменных методов* разделения изотопов. Первый из них для некоторых изотопов вышел уже на стадию полупромышленной реализации, второй найдется еще на уровне лабораторных разработок.

Проблему разделения изотопов невозможно обсуждать, не коснувшись сначала увлекательной истории их открытия, которая неразрывно связана с серией других научных открытий, определивших лицо атомной и ядерной физики в XX веке [1-4].

События, последовавшие за открытием изотопов, вначале не предвещали ничего необычного. Естественно, что первым шагом ученых стало установление *изотопного состава* всех элементов, заполняющих клетки периодической системы. Здесь им очень помогло изобретение Френсисом Астоном и Артуром Демпстером так называемых *масс-спектрометров* – приборов, позволяющих разделять по массам пучки ионов с помощью их отклонения в электрическом и магнитном полях. В результате менее чем за 20 лет к 1935 году была составлена почти полная таблица изотопного состава (т.е. числа изотопов и их процентного содержания в природной смеси данного элемента) для всех известных тогда химических элементов. При этом основная заслуга в открытии массива стабильных изотопов различных элементов (210 изотопов) принадлежит английскому ученому Ф. Астону .

Для изучения свойств изотопов и особенно для их применения в научных и прикладных целях требовалось их получение в более или менее ощутимых количествах. В обычных масс-спектрометрах достигается практически полное разделение изотопов, однако количество их ничтожно мало. Поэтому усилия ученых были направлены на поиски других возможных методов разделения изотопов. Это оказалось нелегкой задачей. Как уже говорилось, изотопы почти не отличаются по своим физико-химическим свойствам. Ключевым здесь является слово *почти*, поскольку какие-то малые различия, разумеется, имеют место и в первую очередь это разница в массах ядер атомов изотопов. Что касается собственно ядерных свойств изотопов, то они, как правило, отличаются очень сильно, поскольку при одинаковом заряде ядра недостаток или избыток нейтронов коренным образом меняет структуру ядерных оболочек. Поэтому именно различие в их

ядерных свойствах определяет многочисленные практические применения изотопов.

События, связанные с проблемой разделения изотопов, получили неожиданно бурное развитие в период Второй мировой войны. Накануне этого, в 1939 году, было сделано эпохальное открытие в ядерной физике: обнаружено деление ядер атомов урана под воздействием нейтронов с испусканием некоторого числа вторичных нейтронов. Возникшая в связи с этим возможность осуществления цепной ядерной реакции открывала путь к высвобождению атомной энергии в огромных масштабах.

Оказалось, что именно редкий изотоп урана  $^{235}\text{U}$  является главным делящимся материалом в природной смеси урана. Выделение этого изотопа или, по крайней мере, доведение его концентрации до 90% (по сравнению с 0,72% в исходной смеси) обеспечивало возможность создания атомной бомбы огромной разрушающей силы.

Поскольку уран высокого обогащения требовался в заметных количествах, возникла проблема создания промышленного производства разделения изотопов урана, решение которой потребовало огромных интеллектуальных усилий ученых, технологов и инженеров и привлечения колоссальных материальных ресурсов. Так, казалось бы, частная проблема разделения изотопов урана вышла на государственный уровень и превратилась в политическую, поскольку от ее решения стали зависеть судьбы государств в их историческом противостоянии друг другу. Вот почему в качестве образного отражения этой ситуации нам показалось вполне уместным взять в качестве эпиграфа к этому введению известную фразу Макиавелли *“Разделяй и властвуй”* приписываемую также французскому королю Людовику XI. Об основных этапах решения проблемы разделения изотопов урана в рамках грандиозных по своим масштабам американского (Манхэттенского) и Советского атомного проектов мы попытаемся рассказать в этой книге на основе имеющихся материалов, в том числе опубликованных в самые последние годы.

Разумеется, проблема разделения изотопов не исчерпывается разделением изотопов урана, хотя созданная в послевоенные годы

в различных странах мощная разделительная промышленность, предназначенная для обогащения урана, продолжает действовать и наращивать свое производство. К счастью, речь идет теперь главным образом о мирном использовании урана, обогащенного легким изотопом лишь до 3-5%. Он находит применение при изготовлении так называемых *тепловыделяющих элементов*, которые составляют “начинку” *ядерных реакторов атомных электростанций* и исследовательских ядерных реакторов. Вместе с тем, развитие центробежного метода разделения изотопов (высокоскоростных центрифуг) привело к тому, что в нашей стране появилось хорошо налаженное производство в достаточных количествах целого класса стабильных изотопов химических элементов средних и тяжелых масс таблицы Менделеева. Изотопные материалы нашли широкое применение в промышленности, ядерной энергетике, медицине, сельском хозяйстве и фундаментальных научных исследованиях.

Разделительная промышленность России и других стран представляет собой в настоящее время пример современного наукоемкого производства, в котором используются самые последние достижения научной и технической мысли. Это поистине новая, обращенная в будущее, технология XXI века. Процесс ее создания и совершенствования стимулировал развитие альтернативных методов разделения изотопов, а также применение уже существующих методов к получению в необходимых количествах широкого спектра изотопов других химических элементов.

Значительная часть книги посвящена популярному изложению физических основ молекулярно-кинетических методов разделения изотопов, как наиболее развитых и широко применяемых на практике. Автор надеется, что это позволит лучше понять, какими конкретными представлениями и идеями руководствовались ученые, технологи, конструкторы, которым пришлось развивать эти методы и доводить их до практического воплощения. По ходу изложения этих вопросов нам понадобятся сведения из молекулярно-кинетической теории газов. При этом трудно обойтись без некоторого количества относительно простых, но важных формул. Разумеется, автор знаком с выражением одного западного физика о том, что *каждая новая формула в научно -*

популярной книге сокращает число читателей почти вдвое. Остается надеяться, что в нашем случае это не окажется столь катастрофическим, поскольку приводимые ниже формулы и выражения, как правило, не выходят за пределы школьного курса физики.

И еще одно последнее замечание. Неискушенному читателю может показаться необычным слово *тайны* в названии книги. В оправдание можно было бы сказать, что любой научный поиск связан с постижением тайн и загадок окружающего нас мира. Но наш случай – особый. Потребовалось действительно немалое искусство исследователей, чтобы разгадать тайны, связанные с возможностью использования ничтожных различий в физико-химических свойствах изотопов для получения необходимых изотопов в нужных количествах. Поиски эти оборачивались иногда драматическими ситуациями, которые порой казались неразрешимыми. О некоторых из этих событий мы расскажем ниже.

В дополнение к этому заметим, что завеса тайны возникла над исследованиями ученых в области атомного ядра и разделения изотопов с начала Второй мировой войны, когда после открытия деления ядер атомов урана открылся путь к высвобождению громадных количеств энергии. Из-за очевидной перспективы военного применения исследования в этой области были засекречены во всех воюющих странах, и дальнейшее развитие науки и технологии по производству ядерного горючего и самой атомной бомбы стало тайной за семью печатями. В настоящее время, когда многие из этих тайн оказались раскрытыми, мы, наконец, узнали о напряженной работе над секретами овладения атомной энергией по обе стороны океана, о самоотверженном труде советских ученых и инженеров, сумевших в короткие сроки создать собственную атомную бомбу. Узнали и о важной роли советской разведки в получении ценных для наших ученых сведений, что позволило определиться с уже намеченными важнейшими направлениями исследований по атомному проекту и с помощью огромных усилий наверстать время, упущенное в период тяжелой войны с немецким фашизмом.

*Наука захватывает нас тогда, когда заинтересовавшись жизнью великих исследователей, мы начинаем следить за историей их открытий*

Дж. К. Максвелл

## ГЛАВА 1. ОТКРЫТИЕ ИЗОТОПОВ

### Загадки атомного веса

С детских лет постигаем мы удивительное многообразие и красоту окружающего нас мира. Только к зрелым годам некоторые из нас задаются извечным вопросом: из чего же создан этот мир, из каких кирпичиков сложено все сущее? Может быть, самый простой ответ на этот вопрос давали древние греки: основу мироздания составляют четыре элемента — стихии: *огонь, вода, воздух и земля*. Но уже в те далекие от нас времена философами Левкиппом и Демокритом была высказана замечательная догадка о том, что все вещи в мире состоят из маленьких, невидимых глазу неделимых частиц — атомов. Более двух тысяч лет назад Демокрит писал:

*“...атомы бесчисленны по величине и по множеству, носятся же они во Вселенной, кружась в вихре, и таким образом рождается все сложное: огонь, вода, воздух, земля.”*

В средние века атомистическая гипотеза была надолго предана забвению. Лишь в XVII веке начали бурно развиваться механика и физика, опирающиеся уже не на чистое умозрение, а на опыт и математические расчеты. В химии, благодаря работам Антуана Лорана Лавуазье (1743 -1794) , появились количественные методы исследования веществ. Атомистическая гипотеза снова получила распространение среди ученых и философов.

Из учения Демокрита следовало, что многообразие веществ в природе требует такого же многообразия атомов, из которых они состоят. Однако, к концу XVIII века изучение свойств известных к тому времени химических соединений привело ученых к выводу, что все вещества в природе построены из сравнительно небольшого числа химических элементов.

Как уже отмечалось, определение *элемента* как вещества, состоящего из атомов одного вида, впервые ввел известный английский ученый-натуралист Джон Дальтон (1766-1844). Появление в 1808 году в Лондоне знаменитой книги Дальтона «Новая система химической философии» надолго определило развитие химии как науки.

Если отдавать дань исторической справедливости, то первый набросок атомистической теории с точки зрения химии почти за 150 лет до Дальтона дал англичанин Роберт Бойль (1627-1691). В вышедшей в 1661 году книге “Химик-скептик” он определил химические элементы, как “чистые вещества” или вещества, которые нельзя разложить на более простые тела. Чистые вещества, утверждал Бойль, построены из атомов одного и того же сорта. То, что нынче принято называть химическими соединениями, он относил к так называемым “совершенным смесям”. Однако во времена Бойля из-за скудости химических познаний не было ясно, по какому признаку можно отличать чистые вещества и их смеси. Сам Бойль, например, считал воду одним из немногих чистых элементов, а известные еще с древних времен золото, серебро, медь, ртуть и серу относил к смесям.

Дальтоном было установлено, что соотношение весов двух элементов в химическом соединении всегда одинаково вне зависимости от того, каким способом это соединение получено. Он же сформулировал *закон кратных отношений*: если два элемента образуют друг с другом несколько химических соединений, то отношение их атомных весов в этих соединениях можно выразить простыми дробями. Так, азот с кислородом образуют несколько различных по своим свойствам веществ. В одном из них (закиси азота  $N_2O$ ) на каждые 28 г азота приходится по 16 г кислорода, в окиси азота ( $NO$ ) – 32 г, для азотистого ангидрида  $N_2O_3$  – 48 г, для двуокиси азота  $N_2O_4$  – 64 г и, наконец, для азотного ангидрида  $N_2O_5$  – 80 г. Легко убедиться, что эти веса относятся как ряд целых чисел 1:2:3:4:5.

Дальтон хорошо понимал, что установленные им законы получают свое объяснение только с позиций атомистической

теории. В своей книге он писал: “Каждая частица воды в точности похожа на любую другую частицу воды, каждая частица водорода в точности похожа на любую другую частицу водорода. Химическое разложение и химическое соединение означает лишь то, что атомы удаляются друг от друга или же снова сцепляются вместе”.

Заметим, что закон кратных отношений позволяет определить лишь отношения атомных весов или масс атомов элементов. Естественно поэтому, что за единицу массы удобно было принять массу атома какого-либо одного определенного элемента и выразить массы атомов всех остальных элементов в этих единицах. Получаемые таким образом относительные величины получили название *атомных масс элементов*. Исторически в качестве *атомной единицы массы* (сокращенно – *а.е.м*) во времена Дальтона выступала масса атома водорода. Позднее ее сменила новая единица – одна шестнадцатая часть массы атома кислорода, поскольку именно кислород чаще всего использовался для определения соотношений элементов в различных соединениях. Уже в 20 веке, в 1961 году, ученые пришли к соглашению, что более удобно принять в качестве *а.е.м.* одну двенадцатую часть массы атома изотопа углерода  $^{12}_6\text{C}$ , так что атомная масса этого изотопа точно равна числу 12. При таком выборе единиц и современной точности измерений атомная масса изотопа водорода  $^1_1\text{H}$ , например, оказывается равной 1,0078250 *а.е.м.*

Ко времени Дальтона химики уже научились выделять элементы из химических соединений (например, помимо уже известных водорода, кислорода, азота, углерода, фосфора, железа, меди, золота и др., в 1807 -1808 годах английским химиком Дэви были открыты новые элементы: натрий, калий, кальций, барий и кадмий). Уже Лавуазье в книге «Элементарный курс химии», опубликованной в 1789 году, составил таблицу, содержащую 34 элемента. При этом только в двух случаях он допустил ошибку, отнеся к элементам, в соответствии с воззрениями того времени, «свет» и «теплород» (тепло)

В 1815 году английский естествоиспытатель, врач по профессии, Уильям Праут (1786-1850) заметил, что атомные веса (массы) элементов близки к целочисленным значениям, кратным атомному весу водорода, принятого за единицу. На этом основании он предположил, что химические элементы – это сложные образования, состоящие из атомов первичного элемента древних – *протила*, и процесс их образования в природе идет за счет последовательного объединения (синтеза) с переходом от легких атомов к тяжелым. По мнению Праута атомы всех известных элементов, кроме самого водорода, это такие же молекулы, как , например, вода, только образующие их атомы водорода (протила) сцеплены гораздо теснее и прочнее, так что никакими обычными химическими способами не удастся их разложить. Такая идея выглядела очень заманчиво и поначалу вызвала большой интерес ученых.

В 1826 году Йенс Якоб Берцелиус (1779-1848) опубликовал таблицу атомных весов для большого числа химических элементов (в том числе и для открытых им самим селена, кремния, церия и тория), значения которых отличались относительно высокой по тем временам точностью. В течение своей жизни он проанализировал более двух тысяч различных химических соединений, за что получил титул «короля химиков». Кстати, именно Берцелиус в 1814 году ввел современные обозначения химических элементов по первым буквам их латинских названий. В его таблице содержалось уже 49 элементов. Однако приводимые им атомные веса элементов оказывались, как правило, нецелочисленными, что наносило чувствительный удар по гипотезе Праута..

По мере повышения точности измерения атомных весов химических элементов выяснилось со всей очевидностью, что многие их значения могут быть дробными. Так, в 1860 году бельгийский химик Жан Серве Стас с достаточно высокой точностью определил атомные веса ряда элементов, получив, в частности, для хлора значение, равное 35,46. Все это привело к тому, что предположение Праута было поставлено под сомнение, и только новые открытия в физике XX века, в частности, открытие стабильных изотопов химических элементов, позволили говорить о возрождении гипотезы Праута на новом качественном уровне

знаний. Вот как уже в наше время прокомментировал эти события известный английский ученый Г. Мессе в своей книге «Новая эра в физике»[5]:

*“Это не первый и не последний случай, когда важнейшая закономерность, установленная на основе довольно грубых наблюдений, опровергалась более точными измерениями, но лишь затем, чтобы вновь возродиться после выяснения причины отклонений от выдвинутых ранее простых законов”*

## **Периодическая система элементов**

Огромное значение для развития атомистики сыграло открытие в 1869 году великим русским ученым Д.И. Менделеевым (1834-1907) *периодического закона химических элементов*. В первом издании книги Менделеева “Основы химии”, опубликованной в 1871 году, периодический закон сформулирован так:

*”Физические и химические свойства элементов, проявляющиеся в свойствах простых и сложных тел, стоят в периодической зависимости... от их атомного веса”*.

Это означает, что если расположить элементы в порядке возрастания их атомных весов в виде таблицы — периодической системы, то каждый элемент займет в ней определенное место; свойства элементов при этом будут закономерно изменяться вдоль горизонтальных рядов и будут очень похожими для элементов, расположенных в соответствующих вертикальных столбцах.

Во времена Менделеева казалось естественным принять за основу классификации элементов их атомные веса. Вместе с тем, он отчетливо понимал трудности с обоснованием своей системы. Хотя химикам в ту пору было известно уже 63 элемента, по крайней мере для доброго десятка элементов их атомные веса были определены либо приблизительно, либо просто неправильно. В составленной им таблице только 36 элементов подчинялись принципу возрастания атомных весов. Для 20-ти элементов их места в таблице вначале были определены неверно, а затем в течение нескольких лет исправлялись с появлением более точных данных измерений их атомных весов. 7 элементов вообще не

подчинялись никакой классификации, и Менделеев просто исправил их атомные веса в соответствии со своей таблицей. Убежденность в правильности найденной им системы была настолько велика, что он предсказал на ее основе открытие еще пяти элементов и подробно описал их свойства. По аналогии с уже известными элементами он назвал их *экабором*, *экаалюминием*, *экакремнием* и др. («эка» на санскрите означает «одно и то же»), оставив для них пустые места в своей таблице. Эти элементы: *скандий*, *галлий*, *германий*, *рений* и *технеций* и в самом деле были впоследствии открыты, причем первые три из них в течение 15 лет после предсказаний Менделеева, *рений* – только в 1925 году, а *технеций* был синтезирован лишь в 1937 году.

В 1889 году Менделеев писал:

*«Периодическая изменяемость простых и сложных тел подчиняется некоторому высшему закону, природу которого, и тем более причину, ныне еще нет средств ухватить. По всей вероятности, она кроется в основных началах внутренней механики атомов и частиц».*

Последующее развитие науки и особенно атомной физики полностью подтвердило гениальную интуицию Менделеева. На основе ряда экспериментов было твердо установлено, что порядок расположения элементов в таблице Менделеева определяется его атомным номером, численно равным заряду ядра атома  $Z$ , который во многих случаях оказывается примерно вдвое меньше атомного веса элемента (или массового числа  $A$ ). Мы еще вернемся к этому вопросу позднее.

К настоящему времени известно, что в природе в естественном состоянии встречаются 90 элементов. Наибольший атомный номер ( $Z = 92$ ) имеет элемент *уран*. Два элемента, занимающие промежуточное положение в таблице Менделеева, *технеций* ( $Z = 43$ ) и *прометий* ( $Z = 61$ ) не обнаружены в естественном состоянии, поскольку время радиоактивного полураспада их атомов оказывается существенно меньше, чем возраст Земли. Элементы с атомным номером большим, чем 92, могут быть получены только искусственным путем и называются *трансурановыми*. Наиболее известным из них в связи с

практическим применением в качестве ядерного горючего оказался *плутоний* ( $Z = 94$ ). В лабораториях ученых искусственно получены (как правило, в очень малых количествах, иногда в считанном числе атомов) почти все трансурановые элементы с порядковыми номерами до 118 включительно. При этом элементы с атомным номером большим, чем  $Z = 100$  (*фермий*), получают только на ускорителях путем бомбардировки мишени тяжелыми ионами. В конце 1990-х - начале 2000-х годов научными группами из России, Германии, Японии и США были синтезированы сверхтяжелые элементы с атомными номерами 112-118. Некоторые из них оказались относительно стабильными (живущими не микросекунды, а секунды), что позволило даже изучить их химические свойства. Последний официально признанный элемент, получивший название *коперниций* ( $Z = 112$ ), был зарегистрирован в 2010 году. Элемент с числом  $Z = 118$ , который, как и ряд других, еще не получил названия, замыкает VII период Таблицы элементов и по химическим свойствам должен походить на инертные или благородные газы.

В эпоху Менделеева одна из трудностей в обосновании понятия химического элемента, как вещества, занимающего определенное место в клетке периодической системы, заключалась в *нецелочисленности* атомных весов элементов. Кажется удивительным, что никому из химиков того времени не пришло в голову одно из очевидных объяснений этого факта, связанное с возможностью существования разновидностей атомов одного и того же химического элемента с различными массами. Впервые эту идею напрямую высказал лишь английский физик и химик - сэр Уильям Крукс (1832-1919), выступая в 1886 году на заседании Британской ассоциации науки со знаменитой речью “О происхождении химических элементов”. Процитируем одно место из этой речи:

*“Вероятно, наши атомные веса представляют только среднюю величину, около которой действительный атомный вес атомов колеблется внутри известных тесных пределов... Я думаю поэтому, что когда мы говорим, например: атомный вес кальция есть 40, мы в сущности выражаем этим, что большинство*

*атомов кальция действительно имеют атомный вес 40, но что немалое число их имеют цифры 39 или 41, но другие, менее многочисленные, - цифры 38 или 42 и т.д.”*

В этих словах, по существу впервые, выражена мысль, что место одного элемента в таблице Менделеева может занимать совокупность химических элементов, отличающихся атомными весами, т.е. фактически введено понятие *изотопов*. Потребовалось, однако, еще не менее четверти века, прежде чем это понятие обрело конкретный физический смысл.

## **Пятилетие открытий**

Открытие изотопов было подготовлено событиями в химии и особенно в физике, наступившими на рубеже двух веков. Годы с 1894 по 1898 не зря называют *пятилетием открытий*. В истории развития науки нередко встречаются периоды, когда на небольшом отрезке времени концентрируется ряд выдающихся открытий, определяющих все ее последующее развитие. Таким периодом в развитии физики оказались последние годы XIX века, таким же временем можно считать 1911-1913 годы XX века, когда была предложена ядерная модель атома Резерфорда, сформулированы постулаты Бора о строении атома, окончательно установлена структура радиоактивных рядов и предложены правила сдвига Фаянса — Содди. Временем выдающихся научных событий ознаменовалось “великое трехлетие” ядерной физики (1932-1934), когда были открыты нейтрон и позитрон, явление искусственной радиоактивности, создана протонно-нейтронная модель атомного ядра.

Но вернемся к событиям на рубеже двух веков. В последнее десятилетие XIX века благодаря в основном блестящим работам известных английских ученых Джона Уильяма Рэля (1842-1919) и Уильяма Рамзая (1852-1916) один за другим были открыты благородные или инертные газы. Самый легкий из инертных газов *гелий* (от греческого «гелиос» — солнце) был открыт еще в 1868 году двумя астрономами: французом Пьером Жансеном и англичанином Дж. Н. Локьером при изучении спектров Солнца, в

которых была обнаружена ярко-желтая линия, не встречавшаяся ранее в спектрах других элементов. Наличие гелия в земных условиях У. Рамзай обнаружил в 1895 году, наблюдая спектры паров (с той же желтой линией, что и в солнечном спектре), образующихся при нагревании минерала клевеита, содержащего радиоактивные уран и торий. Позже выяснилось, что значительные количества гелия выделяются вместе с природными газами в различных районах Земли, являясь продуктами распада радиоактивных элементов, содержащихся в земных породах.

В 1892 году Рэлей установил, что один литр азота, выделенного из воздуха (после удаления  $O_2$ ,  $CO_2$  и  $H_2O$ ) весит почти на шесть миллиграммов больше, чем литр азота, выделенного из его химических соединений (литр азота из воздуха весил 1,2565 г, а полученного химическим путем 1,2507 г.). Тщательный анализ этого ничтожного весового различия (с использованием различных химических реакций по связыванию атмосферного азота и развитых к тому времени способов сжижения газов) позволили Рэлею и Рамзаю выделить из воздуха целую группу новых элементов. Основной их них, названный *аргоном* (от греческого слова *ленивый, бездеятельный*), составляет в воздухе 0,93 объемных процента. Остальные газы: *неон (новый)*, *криптон (скрытый)* и *ксенон (незнакомец)*, открытые У. Рамзаем и М.У. Траверсом в 1898 году, представлены в воздухе в количествах, составляющих  $10^{-4}$  –  $10^{-5}$  объемных процента.

Инертные газы заняли особое место в Таблице элементов, придав, тем самым, периодической системе законченность и стройность. Кстати, значение этих открытий признал и сам Менделеев, предложивший в 1900 году (независимо от Рамзая) включить благородные газы в отдельную *нулевую группу* своей таблицы, поскольку из-за их инертности им приписывалась нулевая валентность (в современной версии периодической системы элементов инертные газы образуют подгруппу восьмой группы).

Другая выдающаяся серия открытий была связана с проводившимися долгие годы исследованиями прохождения электричества через газы, в частности, с изучением так называемых *катодных лучей*, возникающих в разрядной трубке. Катодные лучи

были открыты в 1859 году Юлиусом Плюккером и детально изучены Евгением Гольдштейном, которому и принадлежит их название. Еще Майкл Фарадей в 1838 году, пропуская ток от электростатической машины через стеклянную трубку с впаянными электродами, в которой воздух был откачан до низкого давления, наблюдал фиолетовое свечение, исходящее из положительного электрода (анода). Это свечение распространялось почти до самого отрицательного электрода (катода) на другом конце трубки. Во второй половине XIX века была существенно усовершенствована техника откачки газа из замкнутых объемов, кроме того, исследователи в лабораториях научились создавать высокую разность потенциалов между электродами, достигающую тысяч и десятков тысяч вольт, с помощью так называемых «индукционных катушек». Все это позволило перейти к систематическому исследованию электрических разрядов в различных газах при низком давлении, что и привело к открытию катодных лучей и их всестороннему исследованию. Плюккером и Хитторфом было установлено, что при прохождении тока через пространство трубки в ней возникает поток прямолинейно распространяющихся лучей, испускаемых катодом, которые можно отклонять в магнитном поле. В 1879 году Кромвель Варли показал, что эти лучи заряжены отрицательно. Большое число катодно-лучевых трубок различного типа было изготовлено Уильямом Круксом, который провел всесторонние исследования катодных лучей и обнаружил, что они вызывают свечение тел и даже могут их расплавить, отклоняются в электрическом и магнитном полях, проникают сквозь твердые тела, а в воздухе проходят путь порядка нескольких сантиметров, в то время как средняя длина свободного пробега молекул составляет при аналогичных условиях всего лишь одну десятитысячную долю миллиметра. В результате Крукс пришел к выводу, что катодные лучи — это поток отрицательно заряженных частиц, размеры которых заметно меньше размеров обычных атомов. Он называл эти частицы «лучистой материей» или «четвертым состоянием вещества». Окончательное доказательство того, что заряд катодных лучей отрицателен было дано в 1895 году в экспериментах французского ученого Жана Перрена.

В ноябре 1895 года замечательное открытие было сделано немецким физиком Вильгельмом Конрадом Рентгеном (1845-1923). Проводя опыты с трубкой Крукса, которую в те времена можно было встретить почти в каждой физической лаборатории, он обнаружил новое излучение, исходящее из того места металлического анода, куда падал пучок катодных лучей. Эффект был случайно обнаружен по свечению полоски картона, покрытого флуоресцирующей солью бария, которая лежала в стороне от работающей трубки Крукса, закрытой непрозрачным картонным футляром. Это свечение возросло при приближении флуоресцирующего экрана к трубке.

Само явление флуоресценции было уже давно известно ученым, поскольку оно нередко встречается в природе: это и свет гнилушек и мерцание светлячков в ночи и северные сияния. Но в наблюдениях Рентгена не это стало главным. Известно высказывание знаменитого Пастера о том, что *“случайность помогает только подготовленному уму”*. Случайно обнаруженный эффект побудил Рентгена к всестороннему и тщательному исследованию свойств нового излучения. Была обнаружена необыкновенная проникающая способность новых лучей, под их действием чернели фотопластинки, воздух начинал проводить электрический ток, в отличие от катодных лучей новые лучи не отклонялись даже в сильном магнитном поле. Это сразу наводило на мысль, что открытое излучение имеет ту же природу, что и электромагнитные волны, однако это было установлено далеко не сразу. (Сам Рентген полагал вначале, что он открыл продольные электромагнитные волны, распространяющиеся в эфире подобно звуковым волнам в воздухе).

Решающее опытное доказательство того, что рентгеновские лучи – это обычные электромагнитные волны, только значительно меньшей длины волны, чем обычный свет, произошло значительно позднее. В 1912 году. Макс Лауэ, а затем Уильям Генри Брэгг и его сын Уильям Лоуренс Брэгг разработали и обосновали методы наблюдения интерференции рентгеновских лучей при их рассеянии на кристаллических решетках твердых тел. Знаменитые *лауэграммы* кристаллов медного купороса вошли вскоре во все учебники физики. При этом на основе предложенных методов

оказалось возможным количественно определять расстояния между атомами решетки и длины волн рентгеновского излучения, которые оказались лежащими в интервале  $10^{-7} - 10^{-8}$  см.

В 1901 году Рентген получает за свое открытие первую в истории физики Нобелевскую премию с формулировкой: «В знак признания выдающегося вклада, который он внес открытием замечательных лучей, названных впоследствии его именем».

Заметим, что честь открытия рентгеновских лучей (или X-лучей, как до конца жизни называл их сам Рентген) упорно оспаривалась немецким ученым Филиппом Ленардом. Этот ученый также много работал с трубками Крукса и даже выводил лучи за пределы трубки, чтобы изучать их пробег в воздухе и воздействие на различные вещества (В 1905 году он все-таки получит за эти исследования Нобелевскую премию). Любопытно привести по поводу этих претензий мнение авторитетного английского физика, директора Кавендишской лаборатории Дж. Дж. Томсона, который (не называя, впрочем, конкретных имен) писал:

*«Один наблюдатель заметил, что его фотографические пластинки затуманиваются, когда поблизости в трубке, наполненной газом низкого давления, происходит электрический разряд. Все что он сделал, это отодвинул пластинки подальше. Свои пластинки он спас, но потерял рентгеновы лучи».*

Буквально через несколько месяцев после открытия Рентгена другое выдающееся открытие было сделано французским ученым Анри Антуаном Беккерелем (1852-1908), обнаружившим, что соединения химического элемента урана испускают новый вид излучения, которые аналогично рентгеновским лучам действуют на фотопластинку, завернутую в черную бумагу. Мало того, с помощью электрометра он обнаружил, что испускаемые ураном лучи делают воздух способным проводить электричество. Продолжая исследования, он установил, что интенсивность излучения определяется только количеством урана в препарате и не зависит от вида соединения, в которое он входит. Таким образом, выяснилось, что это свойство присуще именно атомам определенного химического элемента — урана. Обнаруженное

явление, названное в 1898 году *радиоактивностью*, открыло новую эпоху в исследовании атомных свойств материи.

Наконец, в 1898 году произошло еще одно важное открытие: было надежно доказано существование *электрона* – мельчайшего носителя отрицательного электрического заряда, и окончательно установлена природа катодных лучей, представляющих собой поток электронов. Честь этого открытия принадлежит уже упомянутому выше Джозефу Джону Томсону (1856-1940).

Классический эксперимент Томсона описан во многих учебниках по физике. Пучок катодных лучей попадает в пространство между двумя электродами, создающими постоянное электрическое поле. Одновременно частицы пучка подвергаются действию магнитного поля. Как электрическое, так и магнитное поле в отдельности вызывают отклонение пучка от его первоначального направления. Меняя величину напряженности полей, можно добиться взаимной компенсации их действия. По известным значениям этих полей с помощью простых соотношений вычисляется величина отношения заряда частиц к их массе.

В результате систематически поставленных экспериментов Дж. Дж. Томсону удалось определить реальное значение отношения заряда электронов, образующих катодные лучи, к их массе – величину  $e/m$ . Значение элементарного электрического заряда  $e$  было к тому времени приблизительно известно, его можно было оценить на основе исследования законов электролиза водных растворов или расплавов солей, которые еще в 1834 году были установлены Майклом Фарадеем (1791-1867). Более точное значение заряда электрона получил в своих известных опытах Роберт Эндрюс Милликен (1868-1953), который наблюдал в микроскопе движение мельчайших масляных капель, взвешенных в воздухе. Капли вводились в пространство между двумя металлическими пластинами, некоторые из капель оказывались заряженными электричеством вследствие трения в процессе распыления. Наблюдая медленное падение капель в поле силы тяжести при включенном и отсутствующем электрическом поле, Милликен смог определить их заряд, который оказался кратным некоторому элементарному электрическому заряду  $e$ . Все эти

опыты в своей совокупности позволили окончательно оценить значение массы электрона  $m$ , которая оказалась примерно в 1840 раз меньшей, чем масса атома водорода.

## Радиоактивность и ядерная модель атома

Доказательство существования электрона и открытие радиоактивности поставили на реальную основу выяснение вопроса о структуре атомов. Во-первых, из многочисленных опытов неопровержимо следовало, что электроны входят в состав атомов. Во-вторых, дальнейшие исследования радиоактивности, огромный вклад в которые внесли супруги Пьер Кюри (1859-1906) и Мария Склодовская-Кюри (1867-1934), показали, что число элементов, подверженных радиоактивному распаду, не ограничивается только ураном. Кстати, именно Мария Кюри дала название *радиоактивность* новому явлению, открытому Анри Беккерелем. В 1898 году Мария Кюри независимо от немецкого ученого Эрхарда Шмидта, который установил это первым, обнаружила радиоактивность *тория* и по высокой активности минералов *урана* сделала вывод о возможном наличии в них неизвестных радиоактивных элементов. Вскоре после этого Мария и Пьер Кюри открыли новые радиоактивные элементы – *полоний* и *радий*, в сотни тысяч раз более активные, чем уран. Научный и человеческий подвиг супругов Кюри хорошо известен. На собственные сбережения и при финансовой поддержке друзей они закупили и перевезли в Париж отходы руды, так называемой «урановой смолки», которая добывалась на известном месторождении вблизи Иоахимстали в Чехии. В мало приспособленном для лабораторной работы сарае в течение трех лет упорного труда, включавшего выпаривание растворов, кристаллизацию и ряд другие трудоемких химических процедур, ими были переработаны тонны руды, и, наконец, достигнут желанный результат: выделяются миллиграммовые количества радия и полония. Полученный ими хлористый радий (несколько маленьких белых кристалликов в форме острых иголок) оказался

в миллион раз радиоактивнее, чем такое же количество чистого урана.

В 1899 году к полученным Кюри новым радиоактивным элементам добавился открытый французским химиком Андрэ Дебьерном *актиний*, затем были обнаружены радиоактивные газы, выделяемые торием и радием (так называемые эманации). В опытах Эрнста Резерфорда (1871-1937) и Фредерика Содди (1877-1956) было доказано, что эманация радия – это инертный газ (названный *радоном*), который естественным образом входит в семейство благородных газов. Эманация тория, получившая вначале название *торон*, оказалась, как выяснилось в дальнейшем, лишь одним из изотопов радона.

В исследованиях Кюри и Резерфорда было установлено, что радиоактивные элементы испускают два типа лучей, отклоняющихся в разные стороны в магнитном поле. В результате длительных экспериментов было выяснено, что один из этих видов излучения ( $\alpha$ - частицы), представляет собой поток двукратно положительно заряженных атомов гелия  ${}^4_2\text{He}$ , второй ( $\beta$ - лучи) - поток легких отрицательных частиц – электронов. Испускание  $\beta$ - лучей обнаружил еще в 1898 году Беккерель, чуть позже было показано, что их свойства аналогичны свойствам катодных лучей, о которых уже было известно, что они представляют собой поток электронов. В 1900 году французский ученый Поль Вийяр обнаружил еще один компонент лучей, испускаемых ураном, так называемые  $\gamma$ - лучи – электромагнитное излучение, еще более жесткое (т.е. имеющее меньшую длину волны), чем рентгеновские лучи.

Важнейшим открытием начала XX века в физике стало установление ядерной структуры атомов. Эксперименты по рассеянию  $\alpha$ -частиц на тонких металлических фольгах, проведенные учениками Резерфорда Гансом Гейгером и Эрнстом Марсденом в 1909-1911 годах, показали, что при прохождении  $\alpha$ - частиц через вещество значительная их часть отклоняется на очень малые углы, однако неожиданно обнаруживались редкие случаи (примерно одна частица из 8 тысяч), когда частицы

отражались практически в обратную сторону. Вот как впоследствии описывал сам Резерфорд впечатление от этих результатов:

*«...Это было, пожалуй, самым невероятным событием, какое я когда-либо переживал в своей жизни. Это было почти столь же неправдоподобно, как если бы вы произвели выстрел по обрывку папиросной бумаги 15-дюймовым снарядом, а он вернулся бы назад и угодил в вас».*

Опыты, проводившиеся сотрудниками Резерфорда, были чрезвычайно трудоемкими. Регистрация рассеянных  $\alpha$ - частиц осуществлялась визуальным наблюдением в темноте через лупу или микроскоп сцинтилляций — вспышек от попаданий  $\alpha$ - частиц на экран из сернистого цинка. За 2 года Гейгер и Марсенд считали более миллиона таких сцинтилляций.

Напряженное обдумывание и анализ полученных результатов позволили Резерфорду через два года после начала опытов предложить в марте 1911 года модель строения атома, которая предполагала существование в атоме массивного заряженного тела — ядра (сам термин “атомное ядро”, был введен Резерфордом в 1912 году). Гипотезы о планетарном строении атома выдвигались учеными и ранее, но все они были чисто умозрительными. Только Резерфорду удалось поставить вопрос о строении атома на экспериментальную основу и подтвердить это конкретными математическими расчетами. Им было определено, в частности, теоретическое значение сечения рассеяния заряженных частиц при их кулоновском взаимодействии (которое получило название «резерфордовского сечения рассеяния»).

После появления ядерной модели атома проведенный учеными анализ числа электронов в атоме и величины заряда его ядра для различных химических элементов указывал на то, что для большинства легких элементов заряд  $Z$  примерно равен половине атомного веса  $A$ . В 1913 году голландец Ван ден Брук в коротенькой заметке выдвинул гипотезу, которая почти сразу была повсеместно принята: *порядковый номер элемента в таблице Менделеева равен заряду ядра его атомов*. Вскоре она нашла блестящее подтверждение в экспериментах одного из лучших

учеников Резерфорда Г.Г.Дж. Мозли (1887-1915), который занимался исследованиями спектров характеристического рентгеновского излучения, возникающего при облучении рентгеновскими лучами кристаллов различных химических элементов. При этом использовался сконструированный им кристаллический спектрограф, работавший по принципу брэгговских отражений.

Известно, что рентгеновские лучи в рентгеновских трубках получаются при торможении ускоренных электронов на аноде (применительно к старым трубкам – на так называемом *антикатоде*). В экспериментах Ч. Баркла, начатых в 1907 году, было показано, что рентгеновское излучение состоит из двух частей. Одна из них – это *тормозное* излучение, которое дает так называемый сплошной спектр. Свойства его совершенно не зависят от материала антикатада. После того как напряжение на трубке начинает превосходить некоторое определенное значение, зависящее лишь от свойств материала анода, возникает излучение, которое имеет линейчатый спектр, т.е. состоит из закономерно расположенных достаточно узких спектральных линий. Это излучение было названо *характеристическим*.

В экспериментах Мозли, проведенных в 1913 году, были получены спектры характеристического рентгеновского излучения для 38 элементов от алюминия до золота. Было обнаружено, что при возрастании числа  $Z$  облучаемого элемента на одну единицу происходит малое смещение рентгеновских линий в сторону более коротких волн. Такая особенность рентгеновских спектров получила наглядное истолкование на основе развитой к тому времени Бором теории атомных спектров для видимого излучения, Это было продемонстрировано в двух статьях Мозли, где обсуждались полученные экспериментальные результаты. На рис. 1.1 представлены рентгеновские спектры десяти элементов, у которых исследовались так называемые  $K$  – серии характеристического рентгеновского излучения.

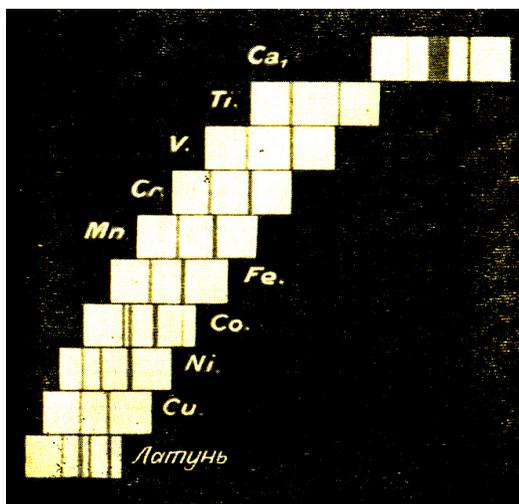


Рис.1.1. Рентгеновские  $K$  - спектры для 10 элементов, лежащих между  $Ca$  и  $Zn$

Из них с очевидностью следует регулярность возрастания длин волн с увеличением атомного номера элемента. Из рис. 1.1 видно, в частности, что между кальцием и титаном пропущен элемент с атомным номером  $Z=21$ . Этот элемент – скандий – был предсказан еще Менделеевым и открыт в 1879 году Нильсоном и Клеве.

Таким образом, исследования Мозли окончательно подтвердили гипотезу Ван ден Брука. Более того, эти эксперименты создали основу для точного определения места открываемых элементов в периодической Таблице. Так, уже сам Мозли оставил место под номером 43 для не известного в то время элемента, который был впоследствии получен искусственно и получил название *технеций*. К великому сожалению для мировой науки этот замечательный и многообещающий ученый в возрасте 28 лет погиб в 1915 году. в одном из сражений Первой мировой войны вблизи местечка Галлиуполи в Турции.

## Открытие изотопов

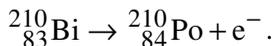
Важным шагом на пути к открытию изотопов была предложенная Резерфордом и Содди гипотеза радиоактивного распада: *радиоактивность есть не что иное, как распад атома на заряженную частицу* (совокупность которых и воспринимается как радиоактивное излучение) *и атом другого элемента, по своим химическим свойствам отличающийся от исходного*. Образовавшийся атом, в свою очередь, может оказаться радиоактивным и дать начало следующему распаду.

В результате длительных исследований было установлено, что распад радиоактивных элементов происходит со строго постоянной скоростью, которая может очень заметно отличаться для различных элементов, но является такой же неотъемлемой характеристикой радиоэлемента, как и его атомная масса.. Резерфорд предложил характеризовать эту скорость *периодом полураспада элемента  $T$* , т.е. временем, за которое распадается половина исходного количества атомов радиоактивного элемента. Так, период полураспада урана составляет 4,5 млрд лет, радия 1600 лет, полония 138 дней, радона 3,82 дня.

Естественным следствием гипотезы радиоактивного распада стало представление о *радиоактивных рядах* или *радиоактивных семействах*, в начале которых есть первый материнский элемент, являющийся радиоактивным, и в конце последний стабильный элемент. Так, если в результате распада урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$  путем нескольких последовательных радиоактивных превращений образуется радий  ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ , который затем порождает эманацию радия (радон  ${}_{86}^{222}\text{Rn}$ ), то после несколько стадий дальнейших превращений такой радиоактивный ряд заканчивается стабильным (уже не претерпевающим радиоактивного распада) свинцом  ${}_{82}^{206}\text{Pb}$ . Все это хорошо иллюстрирует схема радиоактивного распада урана, представленная на рис. 1.2. Здесь же указаны



счет излучения  $\beta$ - частицы (электрона) может сместиться на одно место *вправо*. Например, именно таким образом из радиоактивного висмута образуется открытый Кюри полоний:



В результате исследования радиоактивных семейств было сформулировано знаменитое *правило сдвига* или *закон радиоактивных смещений Фаянса-Содди*, который в современной формулировке выглядит следующим образом:

*Испускание  $\alpha$ -частицы уменьшает порядковый номер  $Z$  элемента на две единицы (смещает элемент на две клетки влево в периодической системе), испускание  $\beta$ -частицы увеличивает номер элемента на единицу (смещает элемент на одну клетку вправо в системе).*

Необычную формулировку закона радиоактивных смещений в 1913 году дал сам Содди:

*“Последовательное испускание одной альфа-частицы и двух бета-частиц в трех радиоактивных рядах в каждом случае возвращает внутриатомный заряд к первоначальному значению в периодической системе, хотя его атомная масса уменьшилась при этом на четыре единицы.”*

Неизбежным следствием из этого утверждения является введение понятия *изотопов*, т.е. элементов, имеющих разные атомные массы, но занимающих одно и то же место в периодической системе и являющихся поэтому практически неотличимыми по своим химическим свойствам.

Закон радиоактивных смещений позволил окончательно установить структуру трех радиоактивных семейств. Два из них начинаются с урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$  и тория  ${}_{90}^{232}\text{Th}$ . В отношении третьего радиоактивного ряда вначале предполагалось, что его родоначальником является актиний  ${}_{89}^{227}\text{Ac}$ . В 1917 году было установлено, что актинию в этом ряду предшествует открытый

перед этим протактиний  ${}_{91}^{231}\text{Pa}$ , и лишь значительно позднее выяснилось, что начальным элементом ряда является изотоп урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$ . Во времена Резерфорда и Содди были известны только эти три радиоактивных ряда. Лишь спустя несколько десятилетий было установлено существование четвертого ряда: открыты и искусственно созданы элементы, родоначальником которых явился нептуний  ${}_{93}^{237}\text{Np}$  — искусственный трансурановый элемент, занимающий место в периодической системе под порядковым номером  $Z=93$ .

Если проследить цепочку превращений радиоактивных элементов, то легко обнаружить, что все три радиоактивных ряда Резерфорда-Содди заканчиваются *нерадиоактивным свинцом*. Простой анализ с использованием правил сдвига показывает, что атомные массы каждого из окончательных продуктов ряда должны быть различными. Так, в схеме распада  ${}_{92}^{238}\text{U}$  ряд завершается изотопом свинца  ${}_{82}^{206}\text{Pb}$  (с массовым числом 206), а ториевый и актиниевый ряды заканчиваются соответственно свинцом с массовыми числами 208 и 207. Из соответствующих измерений к тому времени было известно, что атомная масса природного свинца равна 207,2, поэтому такое противоречие поначалу вызвало недоумение у химиков. Вскоре, однако, были выполнены точные определения атомных масс для образцов свинца различного происхождения, которые дали значения 207,9 для свинца из ториевых руд и только 206,1 для образца из урановых руд. Таким образом, предсказания теории были блестяще подтверждены. Вместе с тем, оказалось возможным распространить понятие изотопов не только на радиоактивные элементы, но и на стабильные. В связи с этим Содди в 1913 году было выдвинуто предположение о том, что *многие из элементов, встречающихся в природе, представляют собой, на самом деле, смесь изотопов, находящихся в различных пропорциях, отчего элементы и имеют нецелочисленные атомные массы*. Так, на новом этапе развития науки, ученые вернулись к давнему предположению Крукса. Это

утверждение, вытекающее из свойств радиоактивных рядов, требовало, однако, независимого подтверждения в экспериментах с обычными химическими элементами, встречающимися в природе, которое вскоре и было получено.

## Параболы Томсона

Одно из первых экспериментальных доказательств существования стабильных изотопов у элементов было получено Дж. Дж. Томсоном в 1912 году (т.е. еще за год до того, как Содди ввел само понятие *изотоп*). В 1907 году Томсон начал эксперименты с пучками положительно заряженных частиц или так называемых *каналовых лучей*. Еще в 1886 году Гольдштейн обнаружил, что если сделать сквозные отверстия в катоде (отрицательном электроде) разрядной трубки, то за катодом (т.е. со стороны, противоположной области разряда) возникают светящиеся лучи. Он назвал их каналовыми лучами, так как они выходили из малых отверстий, сделанных в сравнительно толстой стенке катода.

Дж. Дж. Томсон, который уже имел большой опыт по исследованию поведения катодных лучей в электрическом и магнитном полях (что и привело к открытию электрона), в 1907-1912 годах провел целую серию экспериментов с каналовыми лучами с целью определения отношения  $q/m$  для составляющих их частиц, где  $q$  — заряд частиц,  $m$  — их масса. Эксперименты привели к ряду удивительных результатов. Не зря методика этих исследований в подробностях приводится в известной книге Дж. Тригга “Физика XX века. Ключевые эксперименты” [6].

В опытах Томсона направление движения лучей, выходящих из разрядного промежутка через тонкую трубку (в качестве таких трубок использовались, в частности, полые иглы для подкожных инъекций), определялось по положению светящегося пятна на фосфоресцирующем экране. Пройдя сквозь иглу, лучи в дальнейшем проходили между двумя плоскими пластинами (электродами). Расположенные горизонтально и подключенные к

источнику постоянного напряжения, они создавали вертикально направленную электрическую силу, вызывающую отклонение лучей и смещение светящегося пятна на экране в вертикальном направлении. В этой же области поверх электродов располагались полюса мощного электромагнита, ориентированные так, что магнитная сила вызывала горизонтальное смещение фосфоресцирующего пятна. Вертикальное смещение пятна за счет действия электрического поля  $E$  определяется простой формулой

$$y = kqE / mv^2,$$

где  $v$  – скорость частиц,  $k$  – постоянная прибора. Магнитное поле  $H$  заставляет заряженные частицы двигаться по окружностям вокруг силовых линий магнитного поля, При малых отклонениях пучка участок окружности можно заменить участком прямой линии и соответствующее горизонтальное смещение пучка запишется в виде

$$x = k'qH / mv,$$

где  $k'$  – также некоторая постоянная прибора.

В реальных условиях не удастся обеспечивать монохроматичность пучка, т. е. одну и ту же скорость для всех частиц. Однако, независимо от их скорости, соответствующие отклонения  $x$  и  $y$  связаны соотношением

$$y = C \frac{m}{q} x^2,$$

где  $C$  – константа. Таким образом, при заданной геометрии прибора и известных параметрах электрического и магнитного полей, светящееся пятно для каждого отношения  $q/m$  будет приобретать форму параболы. На рис. 1.3 представлена принципиальная схема эксперимента Томсона.

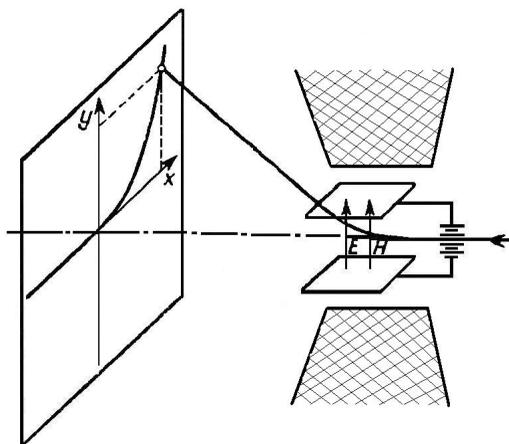


Рис. 1.3. Принцип метода парабол

Проводя в течение ряда лет постоянное улучшение параметров своих экспериментальных установок, Томсон в 1910 году стал применять в качестве экрана для регистрации следов падающего излучения фотолампы, помещенные в вакууме внутри прибора, а в 1912 году окончательно усовершенствовал свою установку. Все это позволило ему заметно повысить точность измерений и с помощью метода парабол быстро сравнивать пучки положительно заряженных частиц (ионов), получаемых из введенных в разрядную трубку различных газов. Достигнутая к тому времени разрешающая способность прибора позволяла установить 10%-ное различие между массами исследуемых компонентов газовой смеси. Особый интерес вызвало исследование смеси легких элементов, на которой Томсон предполагал отработать новую для того времени методику химического анализа. На рис. 1.4 приведен типичный спектр парабол, полученный Томсоном в работе 1913 года .

Вот как сам Томсон изложил результаты этих опытов в лекции, прочитанной им в Кембриджском философском обществе и Королевском институте.

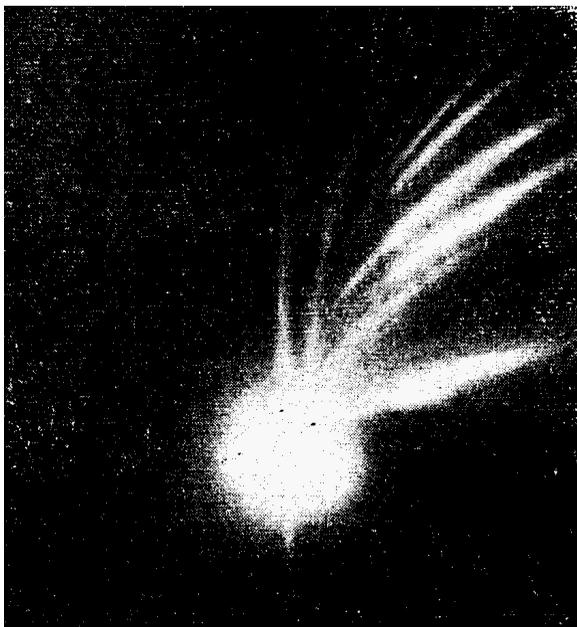


Рис. 1.4. Семейство парабол для легких инертных газов

*”На фотографии... мы обнаружили линии гелия, неона (очень интенсивную) и аргона; в дополнение к ним наблюдалась линия, соответствующая атомному весу 22, которая не могла быть отождествлена ни с одной из линий известных газов. Сначала я полагал, что эта линия с атомным весом, равным половине атомного веса  $\text{CO}_2$ , должна соответствовать молекуле угольной кислоты с двойным электрическим зарядом (на некоторых пластинках можно было заметить слабую линию, соответствующую атомному весу 44). Медленно пропуская газ через трубку, опущенную в сосуд с жидким воздухом, можно было добиться почти полного исчезновения линии 44, тогда как яркость линии 22 оставалась неизменной.”*

Было еще одно предположение о происхождении линии 22. Она могла бы, например, возникнуть от воздействия на пластинку

молекул гипотетического химического соединения  $\text{NeH}_2$ . Однако, это предположение было вскоре отвергнуто как маловероятное, к тому времени не было известно ни одного химического соединения с инертными газами (от того-то они и получили свое название). Первые соединения ксенона, а затем радона и криптона были обнаружены лишь после 1962 года.

## Опыты Астона

В экспериментах Дж. Дж. Томсона, начиная с 1910 года, принимал активное участие ставший потом широко известным физик Фрэнсис Уильям Астон (1877-1945). Астон решил окончательно проверить гипотезу о существовании двух разновидностей неона и попытался их разделить физическими методами. Вначале он использовал фракционную перегонку жидкого неона, однако эта попытка оказалась неудачной. Тогда Астон решил использовать диффузию газа через пористую глину, одновременно он разработал микровесы высокой точности, чтобы следить за изменением атомной массы неона в ходе очистки. После тысячи операций Астон получил небольшую разницу между образцами, однако эффект был слишком мал, чтобы считать его прямым доказательством существования изотопов.

Оценивая опыты Астона с позиций сегодняшнего дня, можно сказать, что он впервые осуществил изотопное обогащение элементов, используя метод разделения, основанный на различной скорости диффузии компонентов газовой смеси, отличающихся массами частиц, в пористой среде.

Используя тщательно очищенные Астоном образцы неона, Томсон сумел повторить еще раз свои опыты 1912 года, в которых четко обнаруживались две линии с близкими атомными массами, что позволило ему некоторое время спустя заявить с полной уверенностью: *“Итак, по моему мнению, нет сомнений в том, что вещество, называемое неоном, не является простым газом, а состоит в действительности из смеси двух газов, один из которых имеет атомный вес 20, а другой – около 22, причем последний составляет лишь малую часть природной смеси”*.

Это было первым независимым подтверждением существования изотопов у стабильных химических элементов. Любопытно отметить, что в рассматриваемый период времени Томсон, по-видимому, знал о соображениях Содди по поводу существования изотопов не только радиоактивных, но и стабильных элементов, которое вытекало из исследований свойств радиоактивных рядов, но ни в одной из своих статей он не обмолвился об этом. Известно также, что и Содди сдержанно относился к результатам Томсона. Однако полной уверенности в существовании стабильных изотопов у большинства элементов, входящих в периодическую систему, тогда еще не было. В 1918 году Томсон, проводя опыты с хлором, обнаружил только одну параболу, хотя существование изотопов у этого элемента прямо-таки напрашивалось: атомный вес хлора равен 35,5.

## Масс-спектрометры Астона и Демпстера

*Первая мировая война прервала эксперименты по стабильным изотопам. Только в 1918 году к этим исследованиям вернулся Астон, который решил коренным образом изменить и улучшить методику Томсона. В 1919 году он сконструировал прибор, названный масс-спектрографом (или масс-спектрометром). В качестве источника ионов по-прежнему использовалась разрядная трубка, дающая пучок положительных лучей, однако Астоном был найден способ, при котором последовательное отклонение пучка частиц в электрическом и магнитном полях приводило к фокусировке частиц с одинаковым значением отношения  $q/m$  (независимо от их скорости) в одной и той же точке на экране. Схема прибора, дающая качественное представление о принципе такой фокусировки, представлена на рис. 1.5. Диафрагма  $D$  на выходе из электростатического поля выделяет пучок ионов, движущихся с приблизительно равными скоростями. Проходя между цилиндрическими полюсами электромагнита, этот пучок отклоняется от первоначального направления уже в другую сторону. В результате двух последовательных отклонений*

различные траектории частиц одного сорта сходятся в одной точке на экране.

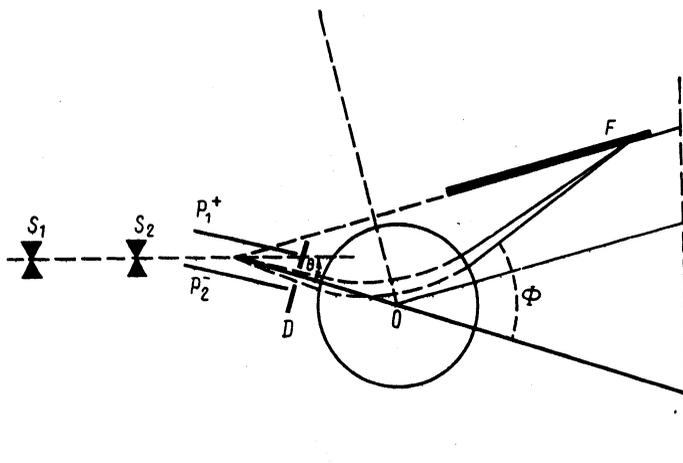


Рис. 1.5. Принципиальная схема масс-спектрометра Астона

Для определения масс атомов компонентов смеси измерялись расстояния между отдельными пятнами, возникающими на фотопластинке  $F$ , и точкой, соответствовавшей первоначальному направлению пучка. Полный набор таких пятен (или линий) различной интенсивности на фотографии характеризовал массовый состав исследуемой смеси и получил название масс-спектра. Астон добился того, что точность измерения масс изотопов в его приборе составляла 0,1 %, т. е. в 100 раз превышала точность измерений Томсона.

Естественно, что первым химическим элементом, исследованным Астоном, стал неон. Он обнаружил в масс-спектре неона четыре линии, отвечающие однократно и двукратно ионизованным атомам с атомными массами 20,00 и 22,00 . Наблюдаемая интенсивность линий тяжелого и легкого изотопов соответствовала отношению 1:10, откуда и следовало, что естественная смесь иона имеет атомную массу 20,2. Несколько недель спустя после этого Астон проанализировал хлор и ртуть,

показав наличие и у них изотопов. Уже к концу 1920 года Астон изучил изотопный состав 19-ти элементов и у 9-ти из них нашел изотопы. Свой второй масс-спектрометр Астон сконструировал в 1925 году, погрешность измерения масс составляла уже 0,01%, что было вполне достаточно, чтобы различить масс-спектры любого известного элемента. При этом оказалось, что атомные массы изотопов действительно очень близки к целым числам, т.е. кратны массе атома водорода, принятой за единицу. Так, на новом этапе развития атомистики ученые пришли к возрождению старой гипотезы Праута.

Наряду с прибором Астона масс-спектрометр несколько другой конструкции в те же годы был создан Артуром Джеффри Демпстером (1886-1950). В его приборе с помощью специального устройства обеспечивался выход моноэнергетического пучка ионов из ионного источника. Чтобы обеспечить разделение и фокусировку различных компонентов в этих условиях, достаточно воздействия только магнитного поля, которое разворачивало пучок на 180 градусов. На этом принципе работают все современные масс-спектрометры. Прибор Демпстера имел более низкую разрешающую способность, зато в отличие от прибора Астона, который мог использоваться для исследования лишь легко испаряющихся веществ, новый масс-спектрометр позволял исследовать изотопный состав элементов с малой летучестью. Для получения пучка положительных ионов из тугоплавких металлов, Демпстер использовал подогреваемый анод из соответствующего материала. Принципиальная схема прибора Демпстера представлена на рис. 1.6.

Все эти исследования и дальнейшее совершенствование масс-спектрометров привели к тому, что усилиями многих исследователей к 1935 году была составлена почти полная таблица изотопных составов всех известных тогда элементов. В 1936 году была выпущена первая Международная таблица изотопов.

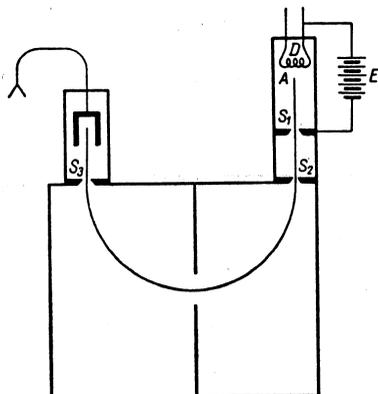


Рис. 1.6. Принципиальная схема масс-спектрометра Демпстера

Сейчас известно около 270 стабильных изотопов (или 287, если включить в таблицу некоторых природных долгожителей с очень большим временем полураспада атомов). Из них 206 изотопов были открыты Ф. Астоном, который еще в 1922 году за свои достижения в этой области был удостоен Нобелевской премии. В 1931 году Астон открыл изотоп урана  $^{238}\text{U}$ , а в 1935 году Демпстер обнаружил линии изотопа  $^{235}\text{U}$  — урана с атомной массой 235, который займет особое место в истории овладения атомной энергией.

## Изотопы водорода и тяжелая вода

История открытия тяжелого изотопа водорода  $^2_1\text{H}$  или D (дейтерия) стоит того, чтобы о ней рассказать отдельно. Она оказалась примером того, как решение, казалось бы, простой проблемы может быть замаскировано от глаз исследователя рядом случайных и компенсирующих друг друга эффектов. По ряду причин существование изотопов у одного из наиболее изученных химиками элемента — водорода было установлено с большим опозданием. Обстоятельства, сопровождавшие это открытие,

несколько напоминают историю открытия аргона и других инертных газов.

Первые предположения о наличии изотопов у водорода и попытки установить это экспериментальным путем относятся еще к 1917 году. В частности, такую попытку предпринял Ф. Астон с помощью изобретенного им масс-спектрометра. Сейчас очевидно, что в те времена сделать это было нереально из-за слишком малой относительной концентрации тяжелого изотопа ( относительное содержание молекул дейтерия в природном водороде составляет 0,012 - 0,014%). Интенсивность пучка ионов дейтерия, отклоняющихся в магнитном поле масс-спектрометра, оказывается в этом случае настолько слабой, что соответствующие линии в масс-спектре просто не проявляются.

В 1927 году. Ф. Астон очень точно для того времени измерил отношение масс атомов водорода и кислорода. Полученное им соотношение можно было представить как 1,00776 : 16,0000. Это находилось в прекрасном соответствии с результатами самых точных измерений атомной массы водорода химическим путем, где соответствующее отношение оказалось равным 1,00777 : 16,0000. Однако вскоре после этого у многих ученых возникли обоснованные сомнения в надежности использования природного кислорода в качестве эталона для определения атомных масс, поскольку кислород сам представляет собой смесь изотопов. Более точные измерения реального соотношения масс изотопов  $^{18}\text{O}$  и  $^{16}\text{O}$  заставили ученых перейти от менее надежной «химической шкалы» к «физической шкале», основанной на более распространенном изотопе.  $^{16}\text{O}$ . Соответствующий пересчет данных химических анализов дал новое отношение атомных масс водорода и кислорода-16, равное 1,00799 : 16,0000, что заметно отличалось от измерений Астона. Хотя расхождение результатов обнаружилось лишь в пятой значащей цифре, это далеко выходило за пределы экспериментальной ошибки.

В 1931 году. было высказано предположение, что причина наблюдающейся разницы лежит в наличии у водорода более тяжелого изотопа. В частности, расхождение полностью

устранялось, если условно положить, что на 5000 атомов обычного водорода  $^1\text{H}$  в смеси изотопов приходится один атом изотопа  $^2\text{H}$ . Оставалось лишь проверить это экспериментально.

Заслуга в экспериментальном обнаружении тяжелого изотопа водорода, названного *дейтерием* (от греческого слова *deuterium*-второй), принадлежит американскому ученому Гарольду Юри с сотрудниками. С учетом чувствительности имеющейся тогда аппаратуры они быстро поняли, что единственный способ обнаружить новый изотоп в заметных количествах заключается в том, чтобы резко повысить его концентрацию в смеси. Ряд теоретических соображений подсказывал, что температура кипения дейтерия в жидком состоянии должна несколько отличаться от температуры кипения обычного водорода. Это и подтвердилось более поздними исследованиями: температура кипения жидкого водорода составляет 20,4 К, а для жидкого дейтерия 23,7 К. Наличие такой разницы давало возможность сконцентрировать тяжелый изотоп водорода с помощью фракционной перегонки при очень низких температурах, подобно тому, как концентрируют спирт, перегоняя его смесь с водой. В экспериментах 1931 года ученые подвергли перегонке (ректификации) 4 л жидкого водорода, получив в остатке всего 1 мл, т.е. уменьшив объем в 4 тысячи раз. Оставшийся миллилитр жидкости оказался обогащенным дейтерием. Это обнаружилось после спектроскопических исследований полученного вещества с использованием уникального спектроскопа Кавендишской лаборатории. В результате тщательного анализа Г. Юри нашел в спектрограммах новые слабые линии, отсутствующие у обычного водорода. При этом положение линий в спектре точно соответствовало расчетам, проведенным Г. Юри на основе теории Бора, применяемой к предполагаемому атому дейтерия.

Вскоре после этого Гарольд Юри вместе с Эдвардом Уэшберном разработали ряд методов выделения дейтерия из обычной воды, многие из которых до сих пор сохранили свое значение. В 1934 году Г. Юри за свои открытия был удостоен Нобелевской премии по химии (Э.Уэшберн, к сожалению, не дожид до вручения этой премии).

Уже в 1933 году, американцы Г. Льюис и Р. Макдональд в результате длительного электролиза обычной воды получили весовые количества *тяжелой воды*, в которой атомы обычного водорода в молекулах замещены атомами дейтерия. Это позволило начать экспериментальное изучение ее свойств. Тяжелая вода кипит при температуре 101,44 С, замерзает при минус 3,8 С, имеет плотность 1,1054 г/см<sup>3</sup> при 20 С.

Для получения даже небольшого количества тяжелой воды в 30-е годы прошлого века необходимо было подвергать переработке огромные объемы обычной воды. Так, в 1933 году группе американских ученых для получения всего 83 мл тяжелой воды 99% чистоты пришлось использовать 2,3 т воды, которую методом электролиза разлагали в 7 стадий.

Значение производства тяжелой воды в промышленных масштабах заметно возросло к началу 40-х годов, когда выяснилось, что она может служить отличным замедлителем нейтронов в ядерном реакторе, использующем цепную реакцию деления урана. К этому времени заметные количества тяжелой воды, как побочного продукта при получении водорода в электролитических ваннах, производились лишь в одном месте в мире – в Норвегии на небольшом заводе в местечке Веморк вблизи Рюкана, где использовалась сравнительно дешевая электроэнергия от каскада построенных в скалах гидроэлектростанций. В 1939 году завод производил около 120 кг тяжелой воды в год. После оккупации Норвегии немецкими войсками в 1940 году производство тяжелой воды стало наращиваться в интересах немецкого атомного проекта. Но всего за годы войны Германия сумела вывезти из Норвегии лишь около 1600 кг тяжелой воды. Мы еще вернемся к этой теме при обсуждении ядерных исследований немецких ученых в годы войны.

После окончания Второй мировой войны строительство тяжеловодных исследовательских и энергетических ядерных реакторов в различных странах привело к необходимости создания крупнотоннажного производства тяжелой воды. К этому времени были уже предложены и освоены в производстве новые методы получения тяжелой воды и дейтерия. Электролитический метод полностью уступил свое место методам ректификации,

химического изотопного обмена и другим физико-химическим методам разделения с использованием так называемых массообменных колонн. Более подробно мы остановимся на этом вопросе в главе 4.

Несколько слов еще об одном тяжелом изотопе водорода  ${}^3_1\text{H}$  или Т (тритии). Поиски этого изотопа начались сразу, как только были получены первые граммы концентрированной тяжелой воды, однако ни спектрометрические, ни масс-спектрометрические методы измерения не давали положительного результата. С учетом достигнутой к тому времени точности измерений стало очевидным, что атомов трития по отношению к атомам обычного водорода, если он и присутствует в природе, должно быть не больше, чем  $1:5 \cdot 10^8$  или 1 атом Т на 500 миллионов атомов Н. Первый тритий был получен искусственно Марком Олифантом и Паулем Хартеком в лаборатории Резерфорда в результате осуществленной ими ядерной реакции с участием ускоренных в разрядной трубке ионов дейтерия. Вскоре было экспериментально доказано, что тритий  $\beta$ -радиоактивен, как показали последующие исследования, период его полураспада равен 12,62 года. В 1950 году тритий был обнаружен в атмосферном водороде. Образуется тритий в верхних слоях атмосферы с участием космического излучения. В течение тысячелетий содержание трития в природе было почти постоянным – непрерывное его образование в атмосфере компенсировалось естественным распадом. Наиболее богатые природные источники трития – дождь и снег, поскольку почти весь тритий, образующийся под действием космических лучей в атмосфере, переходит в воду. При этом его относительное содержание в дождевой воде оказалось еще меньше, чем ранее предполагали ученые ( $\text{T}:\text{H} = 1:10^{18}$ ). Однако с 1954 года (начало испытаний термоядерных бомб) положение резко изменилось, и в дождевой воде содержание трития увеличилось в тысячи раз. В последние годы основным источником техногенного трития в окружающей среде стали атомные электростанции, в реакторах которых

ежегодно производится несколько десятков килограммов трития. В настоящее время весь тритий, используемый для различных целей, получают искусственно, путем облучения лития нейтронами в ядерных реакторах. В результате стало возможным получить значительные количества чистого трития и изучить его свойства, а также свойства его соединений. Так, сверхтяжелая вода  $T_2O$  имеет плотность  $1,2146 \text{ г/см}^3$  при  $20 \text{ C}$ . Заметим, что выделение трития – очень трудоемкий процесс, современная стоимость  $1 \text{ кг}$  трития равна примерно  $30$  млн долларов.

*Перед нами открываются в явлениях радиоактивности источники атомной энергии, в миллионы раз превышающие все те источники сил, которые рисовались человечеству*

**В.И.Вернадский**

## **ГЛАВА 2. ИЗОТОПЫ УРАНА И ОВЛАДЕНИЕ АТОМНОЙ ЭНЕРГИЕЙ**

### **Ядерная алхимия**

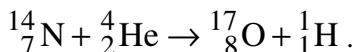
Период двадцатых-тридцатых годов XX века был наполнен чередой выдающихся открытий в ядерной физике. Мы не будем подробно излагать историю этих событий. О них написано много популярных книг [1-4] и серьезных монографий. Отметим лишь наиболее существенные вехи на этом пути.

В первую очередь, следует упомянуть, конечно, об осуществлении *искусственного превращения элементов*, которое наблюдал Эрнест Резерфорд с сотрудниками, бомбардируя  $\alpha$ - частицами ядра атомов азота. Пропуская  $\alpha$ - частицы через сосуд, наполненный воздухом, они обнаружили неожиданное возрастание числа вспышек (сцинтилляций) на экране из сернистого цинка. Дальнейшие эксперименты показали, что этот эффект связан с наличием в воздухе азота, а число и характер сцинтилляций напоминает явления, связанные с длиннопробежными атомами водорода, наблюдавшимися ранее при прохождении  $\alpha$ -частиц в среде водорода. После длительных экспериментов их окончательный результат был сформулирован Резерфордом в 1919 году. следующим образом:

*“Трудно не прийти к выводу, что эти длиннопробежные атомы, возникающие при столкновениях  $\alpha$  частиц с азотом, представляют собой не атомы азота, а являются, вероятно, заряженными атомами водорода. Если это действительно так, то мы должны сделать вывод, что атом азота распадается под*

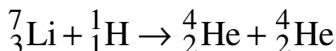
действием интенсивных сил, появляющихся при близком столкновении его с быстрой частицей”.

Фактически это означало, что в результате происходящей ядерной реакции наблюдалось превращение азота в кислород, которое можно было описать следующей схемой



Позднее осуществление такой реакции было надежно подтверждено по наблюдениям трэков (участков траекторий)  $\alpha$ -частиц и образующихся в результате реакции протонов в камере Вильсона. Комментируя это событие, Резерфорд как-то шутливо заметил: *”Из физика я превратился в алхимика”*. Действительно, можно сказать, что в экспериментах Резерфорда осуществилась давняя мечта средневековых алхимиков, пытавшихся найти *философский камень*, способный превращать такие обычные металлы, как свинец и олово, в золото и серебро.

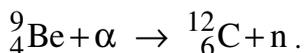
В 1932 году Джон Кокрофт и Эрнест Уолтон построили каскадный генератор для ускорения заряженных частиц, разность потенциалов электрического поля в котором достигала нескольких сотен киловольт, и осуществили целый ряд *ядерных реакций* при облучении мишеней ускоренными протонами. Одна из этих реакций



стала такой же широко известной, как и первая ядерная реакция Резерфорда. Фактически, она стала первым примером *ядерной реакции деления*, хотя и применительно к легким элементам. В процессе этой реакции в результате соединения ядра атома лития с протоном образуется неустойчивый изотоп бериллия с массовым числом 8, который мгновенно распадается на равные части, образуя разлетающиеся с большой скоростью два ядра атома гелия (две  $\alpha$ -частицы).

Наконец, важнейшими событиями в ядерной физике стали: открытие в 1932 году новой частицы — *нейтрона* учеником Резерфорда Джеймсом Чэдвигом и обнаружение в 1934 году *искусственной радиоактивности* супругами Ирен и Фредериком Жолио-Кюри. Существование нейтральной частицы с массой

примерно равной массе ядра атома водорода было предсказано еще Резерфордом, который пророчески заметил, что такая частица должна “свободно проникать в структуру атома” и поэтому статья “новым эффективным инструментом ее исследования”. Еще в 1930 году. В.Боте и Г. Беккер в Германии, облучая  $\alpha$  - частицами некоторые легкие элементы (бериллий, бор и литий), обнаружили, что последние испускают лучи необычайно большой проникающей способности. Эти лучи были приняты ими за  $\gamma$  - излучение, хотя многие детали опыта не находили в этом случае убедительного обоснования. В 1932 году супруги Жолио-Кюри показали, что если это неизвестное излучение падает на парафин или другое водородосодержащее вещество, то в итоге возникают протоны очень большой энергии. Но только Д. Чедвику в результате очень точно поставленных опытов удалось убедительно доказать, что гипотеза  $\gamma$  - лучей оказывается в этом случае несостоятельной, и все становится на свои места, если предположить, что наблюдаемое излучение представляет собой поток нейтронов (нейтральных частиц с массой, примерно равной массе протона). В частности, одна из осуществленных Боте и Беккером реакций при облучении бериллия  $\alpha$  -частицами записывается в этом случае как



Продолжая эксперименты по бомбардировке  $\alpha$  - частицами атомов легких элементов (магния, бора, алюминия) Ирен и Фредерик Жолио-Кюри обнаружили новое излучение, которое представляло собой поток *позитронов* (частиц с массой равной массе электрона, но обладающих положительным зарядом). Теоретически существование таких частиц было незадолго до этого предсказано Полем Дираком, и они были обнаружены Карлом Андерсоном в составе космических лучей. В опытах супругов Жолио-Кюри было установлено, что позитроны продолжают испускаться и спустя некоторое время после того, как прекращено облучение образцов  $\alpha$  - частицами. Анализ продуктов ядерных реакций показал, что источником наблюдавшегося излучения оказываются изотопы новых радиоактивных элементов. Так было открыто явление *искусственной радиоактивности*.

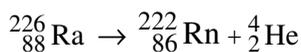
В эти же годы целые семейства радиоизотопов были получены при бомбардировке мишеней различных химических элементов *медленными нейтронами* в экспериментах группы выдающегося итальянского физика Энрико Ферми. Как и в опытах Чедвика, в экспериментах Ферми использовался радон - бериллиевый источник нейтронов. Важным результатом этих исследований оказалось то, что парафин, вода и другие водородосодержащие вещества заметным образом замедляют нейтроны, что приводило во многих случаях к гораздо более высоким скоростям их поглощения ядрами атомов исследуемой мишени. Ученым удалось показать, что по крайней мере 47 элементов из 68 элементов, подвергнувшихся бомбардировке медленными нейтронами, становятся искусственно радиоактивными, испускающими при этом  $\beta$ - частицы.

В результате всех этих исследований раскрылась дверь перед сотнями новых искусственных радиоэлементов с периодом полураспада от долей секунды до миллионов лет, которые являются изотопами известных элементов, начиная от самых легких и кончая самыми тяжелыми. Сейчас таких радиоэлементов известно более двух тысяч.

## **Энергия ядерных превращений**

Здесь мы прервем ненадолго наш рассказ об истории открытий в атомной физике, для того чтобы ответить на вопрос о причине выделения больших количеств энергии, наблюдаемых как в процессах радиоактивного распада, так и в других ядерных реакциях.

Уже в первых опытах Кюри и Резерфорда было установлено, что процессы радиоактивного распада сопровождаются большим выделением энергии, скорость которого остается постоянной во времени. Измерения показали, например, что для такой характерной реакции как



количество энергии, теряемое 1 г радия в течение 1 часа, равно примерно 134,4 кал. Это соответствует потере энергии за год, равной  $1,18 \cdot 10^6$  кал или  $4,94 \cdot 10^6$  Дж. Период полураспада распада радия составляет 1620 лет. Таким образом, полное количество энергии, выделяющееся при превращении одного грамма радия в радон, превышает  $8 \cdot 10^9$  Дж. Для того чтобы почувствовать, как велико это значение, заметим, что при сгорании одного грамма водорода (одна из самых энергичных химических реакций) выделяется энергия, равная  $1,4 \cdot 10^5$  Дж, т.е. в десятки тысяч раз меньшая. Естественным было предположить, что такой большой и непрерывный расход энергии связан именно с превращениями ядер атомов. При этом энергия, выделяемая при распаде радия, перераспределяется между образующимся ядром атома радона и испускаемыми ядром  $\alpha$ -частицами, которые, как показали измерения, уносят основную часть (до 98 %) выделяющейся энергии. Торможение этих высокоэнергетических частиц в среде и приводит к выделению в ней тепла, наблюдаемого на опыте.

Проблема происхождения ядерной энергии была решена лишь тогда, когда появились методы достаточно точного измерения масс изотопов и были использованы выводы специальной теории относительности Альберта Эйнштейна. Рассмотрим вопрос о количественном определении энергии, выделяемой при ядерных превращениях, на некоторых конкретных примерах.

Со времен Ф.Астона, который к 1937 году довел точность измерения масс изотопов до одной тысячной процента, технику измерений улучшили по крайней мере еще в 100 раз. В настоящее время массы изотопов можно определять с относительной погрешностью  $10^{-7}$  или  $0,00001\%$ . Как уже отмечалось (см главу 1), атомные массы элементов удобно выражать в так называемых атомных единицах массы (а.е.м.). Эта единица, равная одной шестнадцатой массы изотопа углерода  $^{12}\text{C}$ , при современной точности измерений определяется как  $1 \text{ а.е.м.} = 1,66054 \cdot 10^{-24} \text{ г}$ . Напомним, что в ядерной физике энергию принято измерять в

мегаэлектрон-вольтах (МэВ). Один электрон-вольт – это энергия, которую приобретает электрон, проходя разность потенциалов один вольт. Энергия, равная 1 МэВ, связана с привычными нам единицами энергии соотношениями

$$1 \text{ МэВ} = 1,602 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} = 3,829 \cdot 10^{-14} \text{ кал} .$$

В соответствии с известной формулой Эйнштейна в каждом теле с массой  $m$  запасена энергия  $E = mc^2$ , где  $c$  – скорость света в вакууме. По этой формуле легко подсчитать, что в одной атомной единице массы вещества заключена энергия

$$E_{a.e.m} = 1,4924 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} = 931,5 \text{ МэВ} .$$

В качестве характерного примера рассмотрим простую ядерную систему, когда один *нейтрон* и *протон* образуют *дейтрон* (ядро атома дейтерия) в результате реакции  $p + n \rightarrow d$ . Современные измерения масс протона, нейтрона и дейтрона дают значения (в а.е.м)

$$M_p = 1,007276 \quad , \quad M_n = 1,008665 \quad , \quad M_d = 2,013553 \quad .$$

Соответствующие им значения энергии равны (в МэВ)

$$E_p = 938,278 \quad , \quad E_n = 939,571 \quad , \quad E_d = 1875,625 \quad .$$

Легко обнаружить, что для частиц, участвующих в этой реакции, не выполняется условие аддитивности масс, т.е. сумма масс протона и нейтрона  $M_p + M_n = 2,015941$  оказывается больше, чем масса составной частицы – дейтрона. Разность энергий, соответствующая этой разнице масс, равна, очевидно,

$$\Delta E = \Delta M \cdot c^2 = 2,224 \text{ МэВ} .$$

Объяснение наблюдаемой разницы в массах состоит в следующем. Заметим, прежде всего, что в специальной теории относительности Эйнштейна утверждается постоянство полной энергии, а не массы. При сближении протона и нейтрона на малые расстояния между ними начинают действовать силы ядерного взаимодействия, в результате чего образуется связанная система. По законам механики потенциальная энергия притяжения частиц отрицательна, (поскольку для отделения частиц друг от друга

нужно совершить работу против сил притяжения). Тогда из закона сохранения полной энергии системы, включающего кинетические энергии частиц и энергию их взаимодействия, следует, что именно появление энергии связи между частицами отражается в уменьшении массы сложной системы. На практике образование дейтрона из протона и нейтрона сопровождается испусканием  $\gamma$ -кванта, причем сумма энергий дейтрона и испускаемого фотона должна равняться начальной полной энергии системы. Поэтому энергия  $\gamma$ -кванта оказывается численно равной энергии связи, т.е. составляет как раз 2,224 МэВ, что легко регистрируется в эксперименте.

В общем случае *энергией связи* ядра называют энергию, необходимую для того чтобы полностью разделить ядро на отдельные свободные нуклоны. Если  $M(Z, A)$  – масса ядра с атомным номером  $Z$  и массовым числом  $A$ , то энергия связи  $E_{св}$  равна

$$E_{св} = \Delta M \cdot c^2 = [ZM_p + (A - Z)M_n - M(Z, A)] \cdot c^2.$$

Величина  $\Delta M$  называется *дефектом массы*.

Проведенный анализ позволяет объяснить и выделение энергии при радиоактивном распаде радия, описываемого приведенной в начале этого параграфа схемой реакции. Используя результаты достаточно точных измерений атомных масс нуклидов, участвующих в этой реакции [4], нетрудно подсчитать, что масса системы уменьшается на величину, равную 0,00523 а.е.м., что должно привести к выделению энергии  $\Delta E = 4,88$  МэВ. Из них примерно 4,8 МэВ приходится на  $\alpha$ -частицу, что соответствует огромной скорости этих частиц в веществе, равной 15000 км/с.

Аналогичные несложные расчеты можно провести и для обсуждавшейся выше реакции облучения лития протонами в эксперименте Кокрофта и Уолтона. Дефект массы составляет при этом 0,018623 а.е.м. [4]. Заметим, что протоны, которые использовались при бомбардировке мишени из лития, ускорялись до энергий 0,2 МэВ. Выделяющаяся энергия, которая приходится в

основном на кинетическую энергию двух разлетающихся  $\alpha$ -частиц, равна при этом 17,3 МэВ .

Стоит еще раз напомнить, что при протекании хорошо знакомых нам на практике обычных (не ядерных) химических реакций среднее количество тепла, выделяемое в расчете на одну частицу, составляет обычно несколько электрон-вольт, т.е. энергия ядерных превращений оказывается в миллионы и десятки миллионов раз большей, чем энергия химических превращений. В 1903 году. еще до великих открытий в ядерной физике Ф. Содди писал :

*“Атомная энергия, по всей вероятности, обладает несравненно большей мощностью, чем молекулярная энергия... и осознание этого факта должно заставить нас рассматривать планету, на которой мы живем, как склад взрывчатых веществ, обладающих невероятной взрывной силой”.*

Различные возможности использования энергии ядерных превращений хорошо иллюстрируются характером изменения энергии связи ядер (или дефекта массы) по мере увеличения массового числа  $A$  . Обнаруженная учеными зависимость показана на рис. 2.1, где графически изображена энергия связи на нуклон  $E_{св}/A$  (удельная энергия связи) в функции  $A$  .

Как видно из графика, удельная энергия связи нуклонов у разных атомных ядер неодинакова. Для легких ядер удельная энергия связи сначала круто возрастает от 1,1 МэВ/нуклон у дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  до 7,1 МэВ/нуклон у гелия  ${}^4_2\text{He}$ . Затем, претерпев ряд скачков, удельная энергия сначала медленно возрастает до величины порядка 8,7 МэВ/нуклон у элементов с массовым числом  $A = 50-60$  (максимум приходится на ядра атомов железа), а потом сравнительно медленно снижается у тяжелых элементов. Например, у урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$  она составляет 7,6 МэВ/нуклон.

Очень важно, что максимум приходится на ядра атомов элементов, находящихся в средней части периодической системы. Фактически это указывает на существование двух видов ядерных превращений, которые могут приводить к высвобождению энергии.

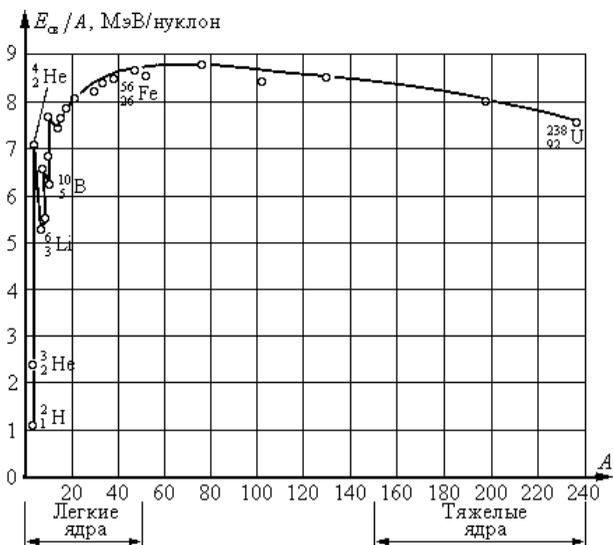


Рис. 2.1. Удельная энергия связи ядер

Очевидно, например, что для тяжелых ядер, лежащих на спадающей ветви кривой, процесс выделения энергии будет происходить при расщеплении или делении ядер на осколки с меньшей массой. В качестве простой иллюстрации этого рассмотрим гипотетический случай, когда ядро урана  $^{238}_{92}\text{U}$  делится на два одинаковых ядра с массовыми числами 119. У этих ядер, как видно из рис. 2.1, удельная энергия связи порядка 8,5 МэВ/нуклон. Удельная энергия связи ядра урана 7,6 МэВ/нуклон. Следовательно, при делении ядра урана выделяется энергия, равная 0,9 МэВ/нуклон или более 200 МэВ на один атом урана. В конце 1938 года, в экспериментах Отто Гана и Фрица Штрассмана было показано, что под действием медленных нейтронов ядро урана действительно делится, распадаясь на два ядра с массами, отличающимися примерно в полтора раза. Известно, что именно это событие открыло путь к практическому

использованию энергии деления ядер при создании атомной бомбы, а затем и в мирной ядерной энергетике.

Рассмотрим теперь другой процесс. Пусть при некоторых условиях два ядра дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  сливаются в одно ядро гелия  ${}^4_2\text{He}$ . Удельная энергия связи ядер дейтерия равна 1,1 МэВ/нуклон, а удельная энергия связи ядра гелия равна 7,1 МэВ/нуклон. Следовательно, при синтезе одного ядра гелия из двух ядер дейтерия выделится энергия, равная 6 МэВ/нуклон или 24 МэВ на атом гелия.

Для того чтобы создать условия, приводящие к реакции ядерного синтеза, нужно сблизить ядра дейтерия на расстояния порядка радиуса действия ядерных сил ( $10^{-13}$  см). Этому препятствуют силы электростатического (кулоновского) отталкивания частиц. Для изотопов водорода энергия кулоновского отталкивания составляет около 0,15 МэВ. Чтобы преодолеть кулоновский барьер и обеспечить сближение частиц, нужно чтобы средняя тепловая энергия частиц составляла примерно такую же величину, что соответствует температуре  $\sim 1,6 \cdot 10^9$  К, т.е. более миллиарда градусов. Именно по этой причине реакции синтеза легких элементов носят название *термоядерных*. Более подробный анализ показывает, что реакцию слияния дейтронов ( $D-D$  синтез) на самом деле можно осуществить уже при температурах, порядка нескольких сотен миллионов градусов. Еще более приемлемой как по выходу энергии, так и по уровню необходимой для осуществления реакции температуры, оказывается реакция слияния ядер дейтерия и трития ( $D-T$  синтез), которая эффективно протекает при температурах порядка 50-100 миллионов градусов.

Именно термоядерный синтез является источником энергии в звездах и солнце и лежит в основе создания водородной бомбы. Уже более полувека ученые и специалисты разных стран мира работают над проблемой века – созданием установок магнитного удержания плазмы, в которых может быть реализована *управляемая термоядерная реакция*. Успех в решении этой проблемы обеспечит человечество практически неограниченным

источником энергии. Мы еще вернемся к обсуждению этих вопросов в главе 4.

## Открытие деления урана. Цепная реакция

Возвращаясь к истории открытий в ядерной физике, перейдем сразу к ключевому событию, ставшему сенсацией XX века,— к открытию в декабре 1938 года деления ядер атомов урана под действием медленных нейтронов в экспериментах немецких радиохимиков Отто Гана и Фрица Штрассмана. Используя тот же химический процесс выделения продуктов распада урана, который позволил супругам Кюри 40 лет назад открыть радий, они показали, что радиоактивные элементы, появляющиеся в результате воздействия нейтронов на уран, по своим химическим свойствам ведут себя так же, как элементы средней части периодической системы: Ва, La, Се. Это означало, фактически, расщепление ядра атома урана на две части, массы которых отличались примерно в полтора раза.

Все это было настолько необычным и так противоречило всему предыдущему опыту в исследованиях превращений ядер атомов, что Ган и Штрассман вначале не поверили своему открытию. Одна из статей, где они излагали свои результаты, заканчивалась словами: *”...Как химики мы должны подтвердить, что это новое вещество является не радием, а барием. Как физики, знакомые со свойствами ядра, мы не можем, однако, решиться на такое утверждение, противоречащее предшествующему опыту ядерной физики”*.

Какая драматическая ситуация! Лишь после того, как эти результаты нашли свое объяснение в работах Отто Фриша и Лизе Мейтнер (которая долгое время работала вместе с Ганом, но была вынуждена эмигрировать из Германии), а также после очень быстрого подтверждения деления ядер урана другими группами ученых, открытие было признано и вызвало необычайный резонанс во всем ученом мире.

Кстати, именно Фриш и Мейтнер впервые предложили термин *деление ядра* по аналогии с *делением клетки* в биологии (О. Ган в

своих первых публикациях называл это явление *расщеплением ядер урана*). О. Фриш описывал появление их термина в таких словах:

*“Поразительное сходство этой картины с процессом деления, которым размножаются бактерии, послужило поводом к тому, что мы назвали это явление в своей первой публикации ядерным делением”.*

Первое, что взбудоражило воображение ученых после сообщений об открытии Гана и Штрассмана, – это необычайно большое количество энергии, выделяемой при акте деления ядер урана, по сравнению с энергией, возникающей при любом другом радиоактивном превращении. Как объяснил О.Фриш в одной из первых своих статей,

*“Два ядра разлетались с энергией почти 200 млн. электрон-вольт, превышая более чем в десять раз энергию любой другой ядерной реакции.”*

Действительно, если сложить вместе массы осколков деления, то их сумма оказывается меньшей, чем масса исходного ядра урана, что говорит о возможности выделения энергии в результате процесса деления урана. Простые расчеты, подобные тем, которые уже производились нами в предыдущем параграфе, показывают, что при делении одного ядра атома изотопа  $^{235}\text{U}$  действительно выделяется энергия, равная примерно 200 МэВ.

Второе очень важное обстоятельство заключалось в следующем. Уже через месяц после открытия деления урана Энрико Ферми в своем выступлении на конференции по теоретической физике в Вашингтоне обратил внимание на то, что при развале ядра урана возможно испускание нескольких нейтронов, которые, в свою очередь, могут вызвать последующие деления, т.е. становится возможной *цепная реакция деления* с выделением огромного количества энергии.

Вскоре наличие вторичных нейтронов при делении было подтверждено в независимых экспериментах группы Жолио-Кюри во Франции, в лаборатории И.В. Курчатова (Г.Н.Флеров и Л.И.Русинов) в России, а также исследователей Колумбийского университета в США.

Здесь любопытно напомнить, что Э. Резерфорд в 1937 году незадолго до своей кончины в письме, адресованном Британской ассоциации наук, высказывал сомнение в том, что получение ядерной энергии в более или менее значительных количествах, достаточных для практического использования, когда-либо будет возможным.

Как это контрастирует с предвидением Жолио-Кюри, который еще до открытия деления ядер урана в своей Нобелевской лекции 1935 года говорил:

*“Если обернуться назад и бросить взгляд на все возрастающий прогресс науки, то можно предположить, что исследователи, могущие по своему желанию разрушать и создавать элементы, узнают также и то, как можно осуществить превращения взрывного характера - настоящие химические ценные реакции. Если осуществить подобные превращения, то удастся высвободить огромное количество энергии, которую можно будет использовать”.*

## **Изотопы урана**

Итак, на авансцене истории появился новый персонаж – уран, поэтому полезно напомнить о некоторых свойствах этого тяжелометалла серо-стального цвета, по виду похожего на серебро. В чистом виде уран был выделен из двуокиси урана  $UO_2$  в 1841 году французским химиком Эженом Пелиго, который по праву считается родоначальником современной химии урана. Природный уран состоит из смеси трех изотопов: на 99,28% из  $^{238}U$  (урана-238), на 0,72% – из  $^{235}U$  (урана-235), имеются также следы  $^{234}U$  (урана-234). Уран достаточно распространен в земной коре, на долю гранита, например, приходится по 25 г урана на каждую тонну.

Особое место среди многих соединений урана занимает гексафторид урана  $UF_6$  (или шестифтористый уран), температура перехода которого из твердого состояния в газообразное при

атмосферном давлении составляет 56С. Гексафторид урана оказывается единственным его газообразным соединением. Кроме того, что очень важно, входящий в это соединение фтор представлен лишь одним изотопом (фтор – элемент моноизотопный).

А это означает, что гексафторид урана, получаемый из природного урана, представляет собой смесь из двух изотопных компонент  $^{235}\text{UF}_6$  и  $^{238}\text{UF}_6$  с тем же относительным содержанием, что и в самом природном уране. Благодаря именно такому удачному сочетанию свойств гексафторид урана стал основным рабочим веществом в промышленных установках разделения изотопов урана и сыграл решающую роль в будущем освоении атомной энергии.

Изотопы урана являются радиоактивными элементами и, как уже говорилось, дают начало, наряду с торием, двум известным радиоактивным рядам. Периоды полураспада ядер урана чрезвычайно велики: 0,7 млрд лет для урана-235 и 5 млрд лет – для урана-238. Из-за различия этих времен можно сказать, что относительное содержание изотопов урана менялось со временем. Около 2 млрд лет тому назад содержание урана-235 в природной смеси изотопов составляло около 3%.

Здесь впервые следует сказать о еще одной важной характеристике, помимо массы и периода полураспада, которая отличает ядра атомов одного изотопа от другого. Речь идет о так называемых *эффективных сечениях ядерных реакций*, которые характеризуют вероятность того, что при облучении (бомбардировке) каким-либо видом частиц определенная часть ядер в выделенном объеме облучаемого образца претерпит ядерные превращения (вступит в реакцию). При исследованиях взаимодействия нейтронов с различными веществами выяснилось, что сечения поглощения нейтронов ядрами существенно зависят от энергии нейтронов. Например, при очень малых энергиях нейтронов  $E < 0,1$  эВ (такие нейтроны называют тепловыми) очень большим сечением поглощения обладают ядра атомов кадмия, что послужило основанием для использования в дальнейшем

кадмиевых стержней для регулирования (прекращения) протекания цепной реакции деления в ядерных реакторах.

Что касается урана, то на измеренных зависимостях сечения поглощения нейтронов от энергии были обнаружены характерные всплески (резонансы) при энергиях порядка 10 эВ. Таких резонансов в сечении поглощения нейтронов ядрами урана-238 оказывается, на самом деле, несколько (восемь в интервале энергий нейтронов от 5 до 200 эВ). При этом характер этих зависимостей, в частности, положение пиков поглощения, оказались существенно различными для двух изотопов урана. Исследования показали, что при энергии нейтронов в несколько электрон-вольт сечение резонансного поглощения нейтронов ураном-238 значительно превышает сечение деления урана-235, поэтому основным процессом в этом случае является превращение урана-238 за счет присоединения нейтрона в следующий за ним в периодической системе радиоактивный изотоп нового трансуранового элемента – нептуния  ${}_{93}^{239}\text{Np}$  (после испускания  $\beta$ -частицы). Возможность такого превращения в принципе была показана Э.Ферми в проведенных его группой опытах с облучением урана нейтронами еще в 1935 году задолго до открытия деления урана (он назвал новый элемент «аузеиум»). Наоборот, уран-235 наиболее эффективно делится совсем «медленными нейтронами» с энергией, меньшей 0,1 эВ.

Впрочем, надежные измерения сечений деления и поглощения нейтронов в уране были еще впереди. В описываемое нами время физики опирались на теоретические расчеты Нильса Бора, который в статье, опубликованной в начале 1939 года, предсказывал, что именно редкий изотоп урана-235 является главным делящимся материалом в природной смеси урана. Ровно через год предположение Бора было подтверждено прямыми экспериментами американских физиков Колумбийского университета с применением циклотрона. Для этих целей использовалось очень небольшое количество (несколько тысячных миллиграмма) практически чистого изотопа урана-235, полученного в Миннесотском университете разделением изотопов

природного урана в специально сконструированном масс-спектрометре.

## Два пути использования энергии деления ядер

В результате выяснения различного поведения изотопов урана по отношению к их взаимодействию с нейтронами намечилось два пути высвобождения энергии в процессе деления ядер урана-235.

Один из них вел к созданию *атомной бомбы* огромной разрушающей силы, что в условиях начавшейся в 1939 году Второй мировой войны становилось актуальной задачей для воюющих держав. Как уже было отмечено выше, находящийся в природном уране в избытке изотоп урана-238 эффективно захватывает быстрые нейтроны, образующиеся в результате деления ядер урана-235, и тем сам пресекает их размножение. Можно сказать, что по отношению к реакции деления урана-235 изотоп урана-238 ведет себя подобно воде в подмоченном порохе. По этой причине неуправляемая реакция взрывного характера могла быть осуществлена либо в чистом уране-235, либо в смеси, которая значительно (до 90%) обогащена этим изотопом.

При этом цепная реакция оказывается невозможной, если потери возникающих в процессе деления ядер нейтронов за счет их выхода через поверхность блока из урана будут превышать количество образовавшихся в нем нейтронов. Так возникло понятие о *критической массе* делящегося материала. Уже в начале 1940 года Рудольф Пайерлс и Отто Фриш, работавшие в лаборатории Джеймса Чедвика в Англии, оценили величину критической массы шарообразного блока из чистого урана-235 примерно в 20 кг, что соответствовало объему около одного литра. Через год к аналогичным выводам о величине критической массы пришел Роберт Оппенгеймер в США. Таким образом, выяснилось, что проблема создания атомной бомбы вполне осуществима и упирается в решение проблемы разделения изотопов урана и накопления в нужном количестве его редкого изотопа – урана-235. В те времена решение этой проблемы казалось почти невозможным.

Второй путь, намеченный в экспериментах французской группы Жолио-Кюри, начатых весной 1939 года, предполагал возможность осуществления *управляемой цепной реакции деления* в природном уране. Поскольку деление ядер изотопа урана-235 наилучшим образом осуществляется с помощью медленных (тепловых) нейтронов, возникло представление о том, что для осуществления управляемой цепной реакции необходимо использовать замедлитель нейтронов, в качестве которого можно использовать только вещества, имеющие очень малое сечение захвата нейтронов.

В экспериментах группы Жолир-Кюри обнаружилось, что одним из оптимальных замедлителей в ядерном реакторе может служить тяжелая вода ( $D_2O$ ), в которой атомы обычного водорода в соединении его с кислородом заменены атомами его более тяжелого изотопа – дейтерия. Другим замедлителем нейтронов, представляющим практический интерес, оказывался углерод, ядра атомов которого, как и ядра атомов дейтерия, обладают очень малым сечением захвата нейтронов. В частности, почти одновременно во Франции, США и Германии в 1939 году возникла идея *гетерогенного ядерного реактора*, в сборке которого блоки из урана чередуются с блоками из замедлителя (углерода). Так был открыт путь к созданию ядерных реакторов, имеющих целью производство тепловой энергии для последующего преобразования ее в электрическую, т.е. путь к современным атомным электростанциям. Позднее исследованиями ученых было показано, что в качестве замедлителя в атомных реакторах может использоваться и обычная вода, однако тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) таких реакторов должны содержать урановое топливо, обогащенное легким изотопом до 2,5-4% по сравнению с 0,71 % содержанием изотопа урана-235 в природной смеси урана.

В конце 1940 года было сделано еще одно важное открытие. Американские ученые – физик Эдвин Макмиллан и химик Гленн Сиборг – показали возможность превращения урана-238 в результате поглощения им нейтронов не только в нептуний-239, но и последующий трансурановый элемент, названный плутонием  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ . Этот элемент не встречается в природе, поскольку период

его полураспада составляет всего 24 тысячи лет. Группа ученых во главе с Сиборгом установила, что плутоний, как и уран-235, способен делиться под действием медленных нейтронов. Таким образом, осуществление цепной ядерной реакции в ядерном реакторе, в котором редкий изотоп урана-235 будет “выгорать” в процессе деления, одновременно приводит к превращению урана-238 в плутоний. Так открылся еще один реальный путь к накоплению необходимого количества ядерного горючего для атомной бомбы. Хотя этот путь уже никак не связан с проблемой разделения изотопов, по своей трудоемкости и сложности химического отделения сильно радиоактивного плутония от других продуктов ядерных реакций в реакторе он представлял собой не менее сложную проблему.

Мы не будем далее обсуждать эту проблему, поскольку она лишь косвенным образом связана с темой книги. Наша ближайшая задача состоит в том, чтобы рассказать о поисках эффективных методов разделения изотопов и о становлении в 1942-1945 годах в США и после окончания войны в Советском Союзе мощных разделительных производств, предназначенных, в силу потребностей того времени, для получения необходимых количеств урана с высокой степенью обогащения его изотопом урана-235.

*Через 40 лет после открытия радия атомная физика перестает быть областью только фундаментальных исследований, достоянием только исследователей-одиночек. Появляется новый избранник – ученый-атомник, чтобы принять самое активное участие в жизни великих наций.*

**Б. Гольдшмидт ,”Атомная проблема”**

## **ГЛАВА 3. УРАНОВАЯ ПРОБЛЕМА**

### **Покров секретности**

Физики-ядерщики различных стран, пришедшие к выводу о реальном осуществлении цепной реакции деления урана, оказались перед нелегким выбором. С одной стороны, продолжая свои исследования, они шли к созданию такого оружия, которое далеко превосходило бы по своим возможностям все, что до сих пор создавалось людьми для взаимного уничтожения друг друга. Осуществление такого проекта на практике без международных договоренностей о запрете оружия массового уничтожения ставило под угрозу само существование человечества. С другой стороны, отсрочка работ в условиях, когда уже началась Вторая мировая война, могла дать реальное преимущество той из сторон, которая первой овладела бы технологическими секретами производства атомной бомбы, поскольку теоретическая возможность ее создания уже была обоснована. Именно угроза того, что немецким ученым, оставшимся в фашистской Германии, удастся первыми решить эту задачу, заставила многих физиков западных стран согласиться на участие в работах по созданию атомного оружия и пойти на беспрецедентное засекречивание работ в этой области.

Инициаторами прекращения публикации работ, относящихся к делению урана, выступили в первую очередь европейские ученые, эмигрировавшие в Америку от преследований фашистов, они лучше других понимали, какую угрозу представляла фашистская

Германия для всего человечества. Среди них наиболее активную позицию занимал известный физик-ядерщик венгерского происхождения Лео Сциллард, который одним из первых после полученных сообщений о делении урана предсказал возможность цепной реакции. Правда, до тех пор пока не было получено достоверных данных о количестве нейтронов, возникающих в процессе деления, он продолжал питать слабую надежду на ее неосуществимость. В отчаянной телеграмме, направленной Жолио-Кюри во Францию в феврале 1939 года (содержащей более 140 слов!), он призвал ученых прекратить последующие публикации по делению урана и закончил ее словами: *”Мы все надеемся, что количество выделяющихся нейтронов либо равно нулю, либо недостаточно, и что нам не придется больше беспокоиться по этому поводу”*.

Этим надеждам, однако, не удалось сбыться. Как уже было отмечено выше, в опытах группы Жолио-Кюри и нескольких групп ученых в других странах было обнаружено, что на каждый акт деления ядра урана-235 приходится в среднем до 2 - 3-х вторичных нейтронов (впоследствии было более надежно установлено, что среднее число освобождающихся нейтронов равно примерно 2,42). Последняя статья французских ученых была отправлена в печать и вышла в журнале «Нейчур» в апреле 1939 года. Несколькими месяцами позже, перед самым началом Второй мировой войны, каждая страна начала самостоятельно применять меры по сохранению секретности в исследованиях проблемы урана.

## **Немецкий атомный проект**

Забегая вперед, можно сказать, что опасения западных ученых по поводу того, что Германия сможет первой создать атомное оружие, оказались, к счастью, преувеличены. Только после оккупации Германии и окончания войны стало очевидным, что немцы не смогли слишком далеко продвинуться в своих исследованиях. Истории немецкого атомного проекта посвящено много различных документальных материалов. Пожалуй, наиболее

подробно и аргументированно эта история изложена в книге Д. Ирвинга [7].

Хорошо известно, что многие крупные ученые с приходом к власти Гитлера эмигрировали из Германии. Вместе с тем, в фашистской Германии оставался ряд известных физиков-ядерщиков, среди которых были физики-теоретики Вернер Гейзенберг, Карл-Фридрих фон Вайцекер, экспериментаторы Отто Ганн, Вальтер Боте и другие. Уже в сентябре 1939 года большинство из них было привлечено к работе над немецким атомным проектом.

В Германии существовали реальные предпосылки для создания атомной бомбы. У нее имелись не только крупные специалисты в области ядерной физики, но и необходимые запасы урана. После оккупации Чехословакии она овладела самыми богатыми урановыми рудниками в Европе, а после захвата Бельгии в 1940 году германские власти конфисковали 1200 т уранового концентрата, доставленного из Бельгийского Конго (что составляло почти половину мировых запасов этого материала). После того как немецкие войска вторглись в Норвегию, в распоряжении немцев оказалось единственное в Европе эффективно работающее предприятие по производству тяжелой воды в местечке Веморк (недалеко от г. Рьюкан). Значительные количества тяжелой воды были необходимы, наряду с ураном, для запуска ядерного реактора (или «уранового котла» по терминологии того времени).

Началу работ по немецкому атомному проекту предшествовало письмо двух физиков из Гамбурга Пауля Хартека и Вильгельма Грота, отправленное в военное министерство Германии. В нем обращалось внимание властей на то, что последние события в ядерной физике *«открывают возможности для изготовления взрывчатого вещества, которое по своей разрушительной силе на много порядков величины превзойдет взрывчатые вещества обычных типов»*. Реакция властей на это обращение последовала спустя несколько месяцев. В сентябре 1939 года при военном министерстве было собрано секретное совещание с участием ведущих немецких специалистов в области ядерной физики. На нем, в частности, обсуждались ставшие к тому времени известными теоретические результаты Н. Бора, из которых

следовало, что ядерной взрывчаткой является фактически изотоп уран-235. Одной из первоочередных задач, которая была сформулирована по итогам этого совещания, было поручение профессору П. Хартеку, ранее работавшему в Англии с Резерфордом, осуществить попытки разделения изотопов урана для получения легкого изотопа урана в заметных количествах.

На втором совещании ядерных физиков в Берлине, в работе которого впервые принял участие В. Гейзенберг, активно обсуждались проблемы, связанные с созданием ядерного реактора и выбором материалов для замедлителя нейтронов в реакторе. Следует сказать, что в дальнейшей работе немецких ученых над ядерным реактором роковую роль сыграли ошибочные результаты экспериментов в группе Вальтера Боте по определению среднего пробега медленных нейтронов в графите. Последствием этой ошибки явилось то, что графит был забракован в качестве возможного замедлителя нейтронов, и вся ставка была сделана на тяжелую воду. Иной вывод был сделан в английских и американских исследованиях, что позволило Э.Ферми с сотрудниками уже в декабре 1942 года запустить под трибунами чикагского стадиона в США первый в мире реактор на медленных нейтронах с графитовым замедлителем.

Научным центром немецкого атомного проекта стал Физический институт Общества кайзера Вильгельма, руководимый В. Гейзенбергом и подчиненный Министерству вооружений Германии. Исследования и расчеты В. Гейзенберга показали, что для осуществления незатухающей цепной реакции в урановом котле необходимо использовать около 5 т урана и примерно столько же тонн тяжелой воды. Если с ураном дело обстояло более или менее благополучно, то запасов тяжелой воды не было. Лишь после оккупации немцами Норвегии фирма «Норвегиан-гидро» обязалась за счет расширения электролитического завода в Веморке обеспечить производство 1,5 т тяжелой воды в год.

С норвежским заводом по производству тяжелой воды связан ряд примечательных событий Второй мировой войны. Опасаясь, что немцы добьются успехов в своих ядерных исследованиях, англичане с помощью норвежских патриотов предприняли ряд диверсий по уничтожению основных цехов завода и запасов

тяжелой воды, произведенных в Норвегии. Как только в 1941 году в Англию поступили первые сообщения об увеличении поставок тяжелой воды в Германию, британская разведка начала подготовку операции по уничтожению завода в Веморке. С помощью главного инженера завода норвежца Йомара Бруна в Лондоне были получены чертежи и фотографии завода. После этого британское командование решило забросить в Веморк десантную группу из 36 специально обученных саперов для последующей наземной атаки и взрыва завода. К сожалению, операция сорвалась уже на первом ее этапе из-за плохой подготовки. Десантники, посаженные в два планера, каждый из которых буксировал бомбардировщик, так и не долетели до места высадки. Один из планеров из-за обледенения рухнул в море, другой в условиях плохой видимости столкнулся со скалой. Большинство участников операции погибло, более десятка оставшихся в живых были захвачены в плен немцами и затем расстреляны. Только через три месяца после этого трагического события англичанам все-таки удалось атаковать норвежский электролизный завод. На этот раз в группу из 10 человек входили специально подготовленные в Англии диверсанты из числа норвежских патриотов. После выброски на парашютах, они подошли на лыжах к хорошо укрепленной и охраняемой территории завода. Трое из них под прикрытием остальных сумели проникнуть на территорию цеха, в котором находились аппараты с высокой концентрацией тяжелой воды, и заложили под них взрывчатку. Взрывом были разрушены все электролитические ванны, в результате чего немцы потеряли около тонны тяжелой воды. Наконец, уже в 1944 году последние запасы тяжелой воды в несколько тонн, погруженные немцами на паром на норвежском озере Тинсье с целью переправки их в Германию, оказались на дне озера в результате взрыва парома, подготовленного британской разведкой вместе с норвежскими патриотами.

В итоге за все годы войны Германия сумела вывезти из Норвегии лишь около 1600 кг тяжелой воды. Все это привело к тому, что Гейзенберг с сотрудниками до конца войны, несмотря на значительные усилия немецких ученых и техников, так и не смогли осуществить реальный запуск ядерного реактора.

Важно отметить, что коллега Гейзенберга фон Вайцекер и независимо от него физик Фриц Хоутерманс очень близко подошли к концепции плутония как ядерного топлива, альтернативного урану-235. В секретном докладе, написанном еще в 1941 году, Ф. Хоутерманс указывал, что в урановом котле возможно получение вещества, более тяжелого, чем уран, но обладающего такими же взрывными свойствами, как уран-235. (Соответствующие результаты, полученные в тот же период времени американцами, были засекречены и недоступны для немецких физиков.) Это означает, что если бы немецким ученым удалось еще на раннем этапе исследований осуществить самоподдерживающуюся ядерную реакцию в урановой сборке с тяжелой водой в качестве замедлителя (с последующим химическим отделением плутония), то это был бы прямой путь к немецкой атомной бомбе.

Для обсуждаемой в настоящей книге темы особый интерес представляет деятельность немецких специалистов на другом возможном пути создания атомной бомбы — решении проблемы разделения изотопов урана и получения легкого изотопа урана в значительных количествах.

Пауль Хартек уже имел практический опыт по разделению изотопов ряда элементов (включая ксенон и ртуть) в так называемых *термодиффузионных колоннах*, предложенных немецкими учеными Клузиусом и Диккелем. О методе термодиффузии мы еще расскажем в соответствующем месте книги. В своей гамбургской лаборатории Хартек с сотрудником установили колонну из двух никелевых труб высотой более 4-х метров. Колонна заполнялась гексафторидом урана. По внутренней трубе колонны пропускали перегретый пар, а внешнюю охлаждали. Однако, наблюдаемое изменение концентрации урана-235 оказалось незначительным, метод не оправдывал себя. Уже через год после первого совещания ученых-ядерщиков на специально созванной конференции по разделению изотопов в октябре 1940 года немецкие специалисты пришли к выводу, что не один из существовавших в то время методов разделения не позволяет организовать в ближайшее время массовое производство урана-235.

Некоторые надежды возлагались теперь на *метод центрифугирования*, которым в Германии достаточно давно занимался Х. Мартин, а в США Дж. У. Бимс, который еще в 1937 году опубликовал в американском журнале описание сконструированной им высокоскоростной газовой центрифуги. Разработкой ультрацентрифуги для обогащения урана занялся теперь Вильгельм Грот, один из лучших учеников П. Хартека. В апреле 1942 года в Гамбурге были проведены испытания первого образца ультрацентрифуги, для которой одна из фирм поставила специально изготовленный электродвигатель на 60 тысяч оборотов в минуту. Однако уже при числе оборотов 50 тысяч в минуту ротор центрифуги, изготовленный из легкого сплава, не выдержал нагрузки и разлетелся на куски. Месяц спустя подобная же история повторилась с другим ротором. Только к июню 1942 года Хартеку и Гроту удалось провести на центрифуге пробные эксперименты по разделению изотопов ксенона, причем полученный эффект хорошо совпадал с теоретическими оценками. В августе 1942 года ротор центрифуги заполнили газообразным гексафторидом урана и было достигнуто повышение концентрации урана-235 до 3.9 % против 0.71% в природной смеси. К маю 1944 года несколько центрифуг прошли длительные испытания и в производстве находилась серия из десяти двухроторных центрифуг, конструкция которых была предложена Хартеком и Гротом. Это было большим успехом. Однако, несмотря на такие обнадеживающие результаты, немецкие специалисты до конца войны так и не смогли создать какое-либо подобие каскада устойчиво работающих центрифуг, обеспечивающих получение необходимого количества обогащенного урана.

В литературе по истории немецкого атомного проекта заметное место уделяется еще одному методу разделения изотопов, который, однако, не получил затем развития ни в одной из стран мира. Речь идет о способе, предложенном Эрихом Багге, который был назван им методом *изотопного шлюза*. Общая идея метода состояла в том, что узкий пучок молекул изотопов пропускался через систему щелей, открываемых и закрываемых в строго определенные моменты времени вращающимися затворами. Скорость вращения затворов подбиралась таким образом, чтобы через щели проходили

«пакеты молекул» одного типа и не проходили пакеты других молекул. Метод основывался фактически на некотором различии в максвелловских распределениях по скоростям для молекул с разными массами. В начале 1942 года начались испытания соответствующей экспериментальной установки сначала с парами серебра, а потом и с  $UF_6$ . Однако эксперименты затянулись, лишь в мае 1944 года была испытана вновь построенная установка, которая проработала безостановочно около 6 суток и выдала ~2,5 грамма сильно-обогащенного урана.. Оставался лишь год до окончания войны, и полученные этим методом результаты уже никак не могли повлиять на судьбу немецкого атомного проекта.

Фактически в тех же количествах обогащенный уран мог быть получен и другим способом – с помощью так называемого *электромагнитного метода*, использующего идею обычного масс-спектрометра, но с гораздо более мощным источником ионов. Плазменный источник ионов, позволяющий получать высокие плотности потока ионов при малом разбросе значений их энергий, был создан во время войны в частной берлинской лаборатории Манфреда фон Арденне. По своим параметрам он даже превосходил источники, использованные примерно в то же время в установках электромагнитного разделения изотопов урана в рамках американского атомного проекта (см ниже). Но в ту пору коллеги Арденне в Германии скептически относились к его работам, которые получили высокую оценку лишь после окончания войны, когда Арденне был приглашен продолжить свою работу в рамках Советского атомного проекта.

Удивительно, что в среде немецких специалистов почти не обсуждались возможности *диффузионного метода разделения изотопов*, хотя именно немецкий ученый, лауреат Нобелевской премии Генрих Герц еще в 1932 году построил каскад из 12 разделительных устройств, позволивших этим методом успешно разделить изотопы неона, а затем и других газов. Освоение диффузионного метода разделения изотопов урана, как стало известно позднее, сыграло решающую роль в производстве делящегося материала в американском (Манхэттенском), а затем и Советском атомных проектах. Следует сказать, однако, что

промышленная реализация процесса разделения изотопов урана любым из известных тогда методов, как показал опыт американского и советского проектов, требует колоссальных материальных затрат, что для воюющей Германии при огромном масштабе ее военных действий и необходимости в расширенном производстве обычных видов вооружений оказалось бы, скорее всего, непосильной задачей.

На практике немецкие специалисты так и не продвинулись дальше представления об атомной бомбе, как обычном ядерном реакторе, в котором инициирована неуправляемая цепная реакция. Роковую роль сыграло также пренебрежительное отношение к науке, не дающей немедленного результата для военных применений, которое было характерно для нацистских лидеров, и отсутствие государственной организации работ по урановой проблеме, что и определило отставание немцев в этой области.

Совершенно другое развитие получили работы по урановому проекту в США, где в течение трех лет удалось осуществить грандиозное строительство комплекса атомных лабораторий и заводов, получивших благодаря ассигнованию двух миллиардов долларов не меньший размах, чем вся национальная автомобильная промышленность Америки.

## **Усилия британских ученых**

Справедливости ради следует заметить, что гораздо раньше, чем американцы, проблемами, связанными с возможностью создания атомной бомбы, озаботились в Великобритании. В Англии со времен Резерфорда существовала великолепная школа физиков, занимавшихся исследованиями атомного ядра. Поэтому в работе над проектом атомной бомбы приняли участие известные физики Джеймс Чедвик, Джон Д. Кокрофт, Марк Л. Олифант, ученые-эмигранты Рудольф Пайерлс, Отто Фриш, и другие. В марте 1940 года Р. Пайерлс и О. Фриш направили меморандум английскому правительству, имевший название *«О создании супербомбы, основанной на ядерной цепной реакции в уране»*. Как уже упоминалось, именно эти ученые сделали первые оценки

критической массы урана-235, при их активном участии начались также работы по проблеме разделения изотопов урана. Дж.Чедвик организовал проведение экспериментов на имеющемся в его распоряжении циклотроне по определению важнейшей характеристики – сечения деления ядер урана на быстрых нейтронах . О роли исследований английских ученых по урановой проблеме еще до начала американского проекта можно прочесть в небольшой по объему книге Р. Кларка “Рождение бомбы” [8], переведенной на русский язык в 1962 году.

Начиная с середины 1940-го года, в условиях начавшейся войны с гитлеровской Германией, английские физики объединились в свой ядерный клуб (“Мауд Комитти”), возглавляемый известным ученым Дж. Томсоном (сыном того самого Дж. Томсона, которому принадлежала честь открытия электрона). В мае 1940 года была создана британская промышленная компания «Тьюб Эллойз» для технической реализации атомного проекта. Уже летом 1941 года Дж. Чедвик заявил: *“Мы убеждены, что создание атомной бомбы реально и может сыграть решающую роль в войне”*. В июле 1941 года Дж. Томсон докладывал английскому правительству о двух возможностях создания атомной бомбы : накоплении урана-235 и выделении плутония из ядерного реактора.

К английским ученым присоединились и эмигрировавшие в Англию Ганс Халбан и Лео Коварски – сотрудники французской группы Ф.Жолио - Кюри. Еще в сентябре 1939 года Жолио-Кюри, который одним из первых понял значение тяжелой воды для ядерных исследований, добился через министра вооружений своей страны, чтобы в Норвегии были закуплены все имевшиеся к тому времени резервы тяжелой воды. В результате в его лабораторию были доставлены двадцать шесть пятилитровых бидонов с драгоценной жидкостью. Французские ученые собирались исследовать возможности запуска цепной реакции в атомном котле, используя смесь пасты из двуокиси урана и сотен литров тяжелой воды. Вторжение немецких войск во Францию прервало эту работу. Запасы тяжелой воды были тщательно упрятаны, а в июне 1940 года дорогостоящие материалы из лаборатории Жолио-Кюри, включая 185 кг тяжелой воды, в сопровождении Халбана и

Коварски были переправлены через Ламанш в Англию. Продолжая в Англии свои исследования, они пришли к тем же выводам, что и Гейзенберг в Германии: для того чтобы осуществить самоподдерживающуюся ядерную реакцию необходимо взять около 5 т тяжелой воды, разместив в ней примерно столько же тонн урана. Но таким количеством тяжелой воды не располагала тогда ни одна страна в мире.

Проблема разделения изотопов считалась одной из важнейших и самой трудной для своего решения. Эта ситуация была очень наглядно описана О. Фришем в начале 1940 года: *“Можно было думать о разделении изотопов в лабораторных масштабах, но получаемые теми или иными методами количества были ничтожными. Осуществить же разделение в промышленных масштабах и получать изотопы хотя бы фунтами было совершенно другим делом. Это подобно тому, как если бы врачу, изготовившему с огромным трудом крупичку нового лекарства, сказали: ”А теперь, доктор, мы хотели бы иметь его в количествах, достаточных для того, чтобы мостить им улицы”*[8].

Проблемой разделения изотопов занялась группа Франца Симона – ученого, ранее проводившего исследование в области физики низких температур и в 1933 году, после прихода к власти Гитлера, эмигрировавшего из Германии в Англию. После анализа различных способов разделения изотопов (термодиффузия, центрифугирование, газовая диффузия) выбор был сделан в пользу газодиффузионного метода, как наиболее осуществимого в тех условиях. При этом рассматривались различные способы изготовления пористых фильтров (мембран), необходимых для реализации метода, изучались свойства гексафторида урана, пригодного для использования в этом методе. Известный физик-теоретик Поль Дирак принял участие в разработке общей теории каскадов диффузионных машин для разделения изотопов. К середине 1941 года группой Симона был подготовлен проект завода по разделению изотопов на основе газодиффузионного метода.

В конце 1941 года началось активное сотрудничество английских и американских ученых, в котором многие

предварительные наработки англичан по урановой проблеме оказались востребованными. Дальнейшая реализация атомного проекта в Англии осложнялась массированными немецкими бомбардировками ее городов и промышленных предприятий. Кроме того, несравнимые с Англией промышленные и финансовые возможности США позволили придать проекту создания атомной бомбы в США совершенно другой размах. В августе 1943 года в Квебеке был подписан договор о сотрудничестве в ядерных исследованиях между правительствами США, Англии и Канады. Несколько лучших ученых Англии (Дж. Чедвик, Р. Пайерлс, М. Олифант) заняли руководящие должности в различных отделениях американских атомных предприятий. В 1946 году эти ученые вернулись вместе с другими коллегами из США в Англию и включились в английский атомный проект, который привел к успеху только в декабре 1952 года.

## **Начало работ в СССР**

Что касается работ по урановой проблеме в СССР, то сразу же после открытия деления урана советскими учеными всерьез рассматривалась возможность практического применения ядерной энергии. Важные теоретические оценки были сделаны в опубликованной в 1940 году статье Я.Б. Зельдовича и Ю.Б.Харитона “Кинетика цепного распада урана”. Авторы показали, что самоподдерживающаяся цепная реакция в природном уране при использовании обычной воды в качестве замедлителя возможна лишь при применении урана, обогащенного изотопом  $^{235}\text{U}$  до концентрации 4-5%. Аналогичный вывод в отношении системы природный уран — тяжелая вода оказался, однако, неверным. Это произошло из-за того что авторы использовали заниженные значения сечения захвата нейтронов ядрами атомов тяжелого водорода, известные к тому времени из открытых американских источников. На самом деле цепная реакция в уране с тяжелой водой в качестве замедлителя оказывается возможной и при использовании обычного необогащенного урана., что следовало из проведенных к тому времени во Франции, а затем и в

Англии экспериментов Г.Халбана и Л.Коварски , располагавшими необходимым запасом тяжелой воды. К тому же выводу несколько позднее пришла и группа В.Гейзенберга в Германии .

В том же 1940 году Я.Б. Зельдович, Ю.Б. Харитон и И.И. Гуревич сделали независимые оценки величины критической массы изотопа  $^{235}\text{U}$  , необходимой для осуществления ядерного взрыва, которые, как выяснилось потом, в основном совпали с оценками, выполненными чуть ранее Фришем и Пайерлсом в Англии. Принципиальное научное открытие – обнаружение спонтанного (самопроизвольного) деления ядер урана было сделано в 1940 году К.А. Петржаком и Г.Н. Флеровым в лаборатории И. В. Курчатова при Ленинградском Физико-техническом институте.

Таким образом, в стране имелось достаточное число квалифицированных специалистов в области ядерной физики, хорошо разбиравшихся в сути урановой проблемы. Об этом говорит также регулярное проведение Всесоюзных конференций по ядерной физике, которые проходили в СССР, начиная с 1933 года, с участием, как правило, ведущих иностранных ученых. На октябрь 1941 года было намечено проведение пятой такой конференции.

В начале 1940 года при Президиуме Академии наук была образована Комиссия по проблеме урана. В июле того же года академик В.И.Вернадский и директор Радиевого института В. Г. Хлопин направили письмо в Президиум Академии наук, в котором наряду с решением других вопросов было предложено «...срочно приступить к выработке методов разделения изотопов урана и конструированию соответствующих установок, для чего поручить Комиссии по изотопам совместно с Комиссией по атомному ядру в двухмесячный срок наметить организации и лиц, которые должны этим заниматься». В сентябре 1940 года Комиссия по проблеме урана приняла план работ на 1941 год, который охватывал деятельность многих академических институтов страны. По инициативе академиков Вернадского и Ферсмана начали предприниматься усилия по поиску источников урановых руд на территории страны.

Вместе с тем, размах работ по урановой проблеме в СССР в предвоенные годы явно не соответствовал важности задачи. Проблемы разделения изотопов только начали обсуждаться, ни по одному из известных методов не было получено заметных результатов. Нерешенной оставалась проблема уранового сырья. По данным Урановой комиссии в 1940 году запас готовых урановых солей составлял всего 300 кг, тяжелой воды 2 кг, радия – несколько грамм.

Проводившиеся в СССР ядерные исследования были прерваны нападением на нашу страну фашистской Германии, поскольку основные усилия ученых сконцентрировались на первоочередных задачах помощи Советской армии в противостоянии врагу. Только в сентябре 1942 года появилось известное распоряжение Государственного Комитета Обороны “ Об организации работ по урану”, и в начале 1943 года научным руководителем этих работ был назначен Игорь Васильевич Курчатов.

О работах советских ученых и инженеров, связанных с решением урановой проблемы, мы расскажем в следующей главе книги. Пока же обратимся к активно продолжавшимся исследованиям по урановой проблеме в США, которые привели в августе 1942 года к централизации и объединению всех работ в рамках так называемого “Манхэттенского проекта”. Разумеется, нас будут интересовать в основном результаты, относящиеся к проблеме разделения изотопов урана. От ее решения, а также от создания промышленного производства плутония зависела судьба создания атомного оружия и, в известной степени, судьба послевоенного устройства мира.

## **Манхэттенский проект**

Итак, начиная с 1940 года исследования по проблеме урана по понятным причинам окутаны завесой тайны. Только в 1945 году после первого испытания американской атомной бомбы и взрывов двух бомб над японскими городами Хиросимой и Нагасаки, приведших к колоссальным разрушениям и человеческим жертвам, правительство США решило опубликовать так называемый отчет

Смита с изложением истории Манхэттенского проекта (Г.Д. Смит “Атомная энергия для военных целей” [9]). Он не затрагивал вопросов секретного характера, но давал общее представление о сути научных и технических проблем, решенных в процессе его осуществления. Одна из целей публикации отчета состояла, по-видимому, в том, чтобы показать грандиозность решавшейся задачи и оправдать перед американскими налогоплательщиками громадные финансовые затраты по проекту. В 1946 году этот отчет по предложению И.В. Курчатова был переведен на русский язык и вышел небольшим тиражом в издательстве Трансжелдориздат (!). Любопытно, что решением Специального комитета, который был создан советским правительством для решения проблем атомного проекта, вышедшим под грифом «Совершенно секретно», было предложено 60% тиража распространить среди заинтересованных научных сотрудников., 20% тиража предоставить для продажи в высших учебных заведениях и оставшиеся 20% пустить в свободную продажу.

Позволю себе одно личное отступление. Автор этой книги хорошо помнит, как он в 1948 году, будучи еще школьником девятого класса в г. Свердловске, с несколькими своими друзьями-одноклассниками, образовавшими своего рода клуб по общим интересам, читал и обсуждал этот отчет. В то время мы уже многое знали об успехах в освоении атомной энергии из популярных статей, публиковавшихся в журналах “Природа”, “Наука и жизнь” и “Техника-молодежи”, а отчет Смита представлял собой вполне доступное по содержанию свидетельство из первых рук. Думаю, что это увлечение школьных лет послужило для автора, как и для многих его сверстников, заметным толчком к решению посвятить свою будущую жизнь физической науке.

Немало интересных сведений о проблемах, решавшихся в рамках Манхэттенского проекта, содержится в опубликованной в 1963 году в США и переведенной на русский язык книге административного руководителя проекта генерала Лесли Р. Гровса “Теперь об этом можно рассказать” [10]. Здесь мы воспользуемся некоторыми материалами, взятыми из отчета Смита и книги Гровса .

Как известно, первая инициатива в том, чтобы убедить правительство США в необходимости поддержки ядерных исследований принадлежала ученым-эмигрантам Л. Сцилларду и

Э. Вигнеру, которые организовали письменное обращение А. Эйнштейна к президенту Ф. Рузвельту, направленное 2 августа 1939 года. В ответ правительство США назначило комитет, известный под названием "Консультативного комитета по урану", который привлек ряд ученых-ядерщиков (в том числе Э. Ферми) к своей работе. В ноябре 1939 года комитет рекомендует правительству закупить графит и двуокись урана для исследования процессов деления.

В течение 1940-41 годов учеными активно изучаются возможности различных методов разделения изотопов урана. В Колумбийском университете Г. Юри и Дж.У.Бимс исследуют метод центрифугирования, а Дж.Р. Данинг и Г. Юри метод диффузии через пористые перегородки. В лаборатории в Беркли (Калифорнийский университет) Э.О.Лоуренс совершенствует метод электромагнитного разделения изотопов. В декабре 1941 года он сообщает, что в состоянии в течение одного часа выделить один микрограмм урана с высокой степенью обогащения его изотопом  $^{235}\text{U}$ . В феврале 1941 года исследовательская группа Г. Сиборга открывает плутоний, и в мае того же года Сиборг публикует сообщение, что плутоний более склонен к делению, чем  $^{235}\text{U}$ . Однако в целом, несмотря на все возрастающий уровень научных исследований, технический прогресс в осуществлении американского атомного проекта в 1940-41 годах был невелик..

Ситуация заметно изменилась к середине 1942 года.. Урановый комитет, входящий в состав Управления по научным исследованиям и разработкам при правительстве США, принимает решение направить реализацию проекта в сторону опытного производства и построить один-два реактора для наработки плутония, а также электромагнитный, центрифужный и газодиффузионный заводы для производства урана-235.

В августе 1942 года программе работ по созданию ядерного оружия было присвоено условное название "Манхэттенский проект". Организационное руководство проектом было возложено на бригадного генерала Л.Р. Гровса, научное руководство — на известного американского физика Роберта Оппенгеймера.

Можно выделить три главные задачи, которые были поставлены перед учеными и привлеченными к проекту американскими фирмами. Одна из них заключалась в создании пригодных для промышленной эксплуатации уран-графитовых реакторов для наработки и извлечения плутония. Вторая задача состояла в разработке проектов и строительстве заводов по разделению изотопов урана. Наконец, завершающей стадией всей этой работы являлась разработка конструкции и реализация взрывного устройства самой атомной бомбы.

Мы остановимся здесь только на одной из задач – проблеме разделения изотопов. Важность этой проблемы была осознана американскими учеными с самого начала работы над проектом. В октябре 1942 года из-за технических трудностей было решено отказаться от строительства центрифужного завода. К проектируемым газодиффузионному и электромагнитному заводам, добавился завод, использующий для разделения изотопов жидкостную термодиффузию. Характерной особенностью осуществляемых проектов явилось то, что из-за дефицита времени было решено пропустить стадию строительства опытных заводов и прямо перейти от исследовательской стадии к промышленному производству.

## **Кухонное сито и разделение изотопов**

Мы уже рассказывали, что в Англии в 1939-40-х годах проблемой разделения изотопов озаботились сотрудники группы Пайерлса и Фриша, среди которых наибольшую активность в этом вопросе проявлял Ф. Симон. Они пришли к выводу, что наиболее технически осуществимым в тех условиях методом разделения может служить *газодиффузионный метод*. Подробнее об этом методе, основанном на различии скоростей диффузии легкого и тяжелого компонентов газовой смеси через пористую перегородку (фильтр) при относительно низком давлении газа в порах, мы расскажем несколько позже. Здесь же обратим внимание на то, что для получения необходимого эффекта разделения давление газа перед фильтром, должно быть в несколько раз меньше

атмосферного, а сам фильтр должен иметь отверстия (или каналы) очень малого диаметра, (порядка одной сотой микрона или  $10^{-8}$  метра, т.е. всего лишь в 50-100 раз больше характерного размера молекул). Пористые фильтры должны быть достаточно тонкими, чтобы пропускать заметные потоки газа, но обладать при этом необходимой жесткостью, чтобы выдерживать возникающие при течении газа через фильтр перепады давления. Кроме того, они должны быть изготовленными из материала, способного работать в химически агрессивной среде гексафторида урана  $UF_6$ , являющегося, как уже говорилось, единственным газообразным соединением урана.

Рассказывают, что Ф. Симон однажды утром появился в Кларендонской лаборатории с простым кухонным ситом, сделанным из металлической сетки. Держа его против света, ученый обратил внимание своих сотрудников на множество мелких дырочек, сказав: “То, что мы ищем, представляет собой нечто подобное, только с гораздо более мелкими отверстиями”. Действительно, задача состояла в том, чтобы создать фильтры, имеющие примерно несколько миллионов отверстий на квадратный сантиметр.

Производственная технология изготовления пористых перегородок (фильтров) до сих пор является одним из наиболее охраняемых секретов промышленности разделения изотопов. Именно благодаря постоянному улучшению их свойств удавалось долгие годы эффективно использовать газодиффузионный метод для наработки обогащенного урана в заметных количествах.

Другая проблема, связанная с этим методом, заключается в очень малом единичном эффекте разделения изотопной смеси урана на отдельном фильтре. Для того чтобы достигнуть заметного эффекта обогащения исходной смеси урана его легким изотопом, диффузионные машины, начиненные комплектом пористых фильтров, требовалось соединить в каскады, состоящие из огромного числа машин, занимающих громадные площади.

## Первый американский газодиффузионный завод

Хотя в Англии к 1941 году уже существовал проект завода по газодиффузионному разделению изотопов, по свидетельству Л.С Гровса [10] эти разработки не сыграли заметной роли в осуществлении американского проекта строительства таких заводов. Вместе с тем, в отчете Смита отмечена большая ценность для американцев научных результатов английских ученых по газодиффузионному методу. Исследования по газодиффузионному методу в США велись в Колумбийском университете под руководством нобелевского лауреата Гарольда К. Юри. Первая большая лабораторная установка, демонстрировавшая возможности газодиффузионного метода при разделении изотопов урана, была создана в Колумбийском университете в октябре 1942 года. Затем сразу же после организации массового производства пористых мембран компанией “Юнион Карбайд” и изготовления компрессоров (насосов) для прокачки газа другой американской компанией начался монтаж отдельных диффузионных секций завода. Масштабы работы были колоссальными: достаточно сказать, что одни только помещения завода, запущенного на полную проектную мощность, занимали площадь более четырех тысяч гектар. Диффузионный каскад состоял из нескольких тысяч ступеней (диффузионных машин, начиненных комплектом пористых фильтров). Для того чтобы привести в действие многочисленные компрессорные установки, прокачивающие через ступени каскада гексафторид урана, потребовалось сооружение специальной электростанции мощностью около 300 тыс. квт. В целом в рамках Манхэттенского проекта на создание атомного центра с заводами для получения обогащенного урана было ассигновано 2 млрд долларов, из них затраты на строительство и пуск в эксплуатацию газодиффузионного завода составили 275 миллионов долларов [10].

На рис. 3.1 и на цветной вкладке (рис. 3.2) представлена панорама газодиффузионного завода К-25, построенного в Ок-Ридже, штат Тенесси. К июлю 1945 года он дал первые необходимые количества урана, обогащенного ураном-235.

Промышленное освоение газодиффузионного метода разделения изотопов урана потребовало колоссальных усилий и самоотверженности людей, участвовавших в этом деле. Здесь уместно привести слова из упомянутого выше отчета Г.Д. Смита: *“...Вероятно, больше чем какая-либо другая группа в Манхэттенском проекте, группа, работавшая над газовой диффузией, заслуживает награды за храбрость и настойчивость, так же как за научные и технические дарования...”*

Для того чтобы довести количество получаемого практически чистого урана-235 до нескольких килограммов, американцы организовали производство на основе совместного использования нескольких способов разделения изотопов. Параллельно газодиффузионному методу группой Абельсона в институте Карнеги в Вашингтоне разрабатывался метод разделения изотопов урана с помощью жидкостной термодиффузии (об этом методе мы также кратко расскажем в соответствующем месте). В июне 1944 года Р. Оппенгеймер предложил использовать этот метод на самой первой стадии разделения для получения слабообогатенного продукта (до 1%  $^{235}\text{U}$ ), который затем можно было бы использовать в качестве исходного материала на газодиффузионном заводе К-25.



Рис. 3.1. Панорама американского газодиффузионного завода К-25 в Ок-Ридже

Завод был построен по соседству с тепловой станцией завода К-25, чтобы использовать пар максимально высокой температуры, генерируемый станцией, для работы термодиффузионных колонн, объединявшихся в каскады (по 102 колонны). Колонна представляла собой вертикальный цилиндр высотой 15 м и состояла из никелевой трубы, проходящей внутри медной трубы большего диаметра. При этом ширина кольцеобразного промежутка составляла всего 0,25 мм. Можно представить, какие высокие требования предъявлялись к поддержанию заданной ширины зазора по всей длине колонны. В качестве рабочего вещества в колоннах использовался жидкий гексафторид урана при давлении ~200 атм. Общее количество таких колонн составляло 2142 штуки. К июню 1945 года завод достиг проектной мощности, однако, концентрация  $^{235}\text{U}$  в обогащенном уране составляла лишь 0,86%. Затем полученный продукт поступал в диффузионный каскад.

## Электромагнитные монстры

На конечной стадии получения продукта— высокообогащенного урана использовался электромагнитный метод разделения. Идея метода основывалась на том же принципе, на котором работали первые масс-спектрографы Ф. Астона и А.Демпстера, т.е. на том известном факте, что более тяжелый ион описывает в магнитном поле дугу большего радиуса, чем менее тяжелый. Этот метод в радиационной лаборатории Калифорнийского университета в Беркли активно развивался изобретателем циклотрона известным американским ученым Эрнстом О. Лоуренсом. В сотрудничестве с Р. Оппенгеймером ему удалось рассчитать и предложить конструкцию *калутрона* — установки для разделения изотопов, в которой применяются значительные по величине ионные токи, более чем в миллион раз превышающие токи, используемые в обычных масс-спектрометрах. Для создания первого калутрона в Беркли был использован гигантский электромагнит, который предназначался первоначально для строительства циклотрона. Диаметр полюсов этого магнита составлял более 4,5 м (184 дюйма)

с расстоянием между полюсами около 1,8 м (72 дюйма). Громадные установки, смонтированные затем в цехах завода электромагнитного разделения изотопов, оказались настоящими электромагнитными монстрами, в которых использовались высокие напряжения и сильные магнитные поля, а также предъявлялись высокие требования к вакууму. Они были по-своему уникальными и никогда ранее не применялись в промышленных масштабах. Огромные магниты были целиком заключены в толстые сварные оболочки из стали. Отмечалось, что количества стали, затраченного на изготовление всех электромагнитов, хватило бы для создания военного флота средней мощности. Для обмоток и шин потребовалось очень большое количество хорошо проводящего металла. Из-за отсутствия достаточного количества меди, используемой в других отраслях оборонной промышленности США, создателям калютронов пришлось запросить 14 т серебра из запасов государственного казначейства с условием возвращения его через шесть месяцев после окончания войны. Со скрипом, но финансовое ведомство США вынуждено было согласиться на эти условия.

Каждая установка для одной из стадий электромагнитного разделения состояла из 96 магнитов и 96 приемных камер и называлась из-за своей своеобразной конфигурации “рейстреком” (т.е. гоночным треком). Рейстреки второй стадии разделения состояли из 36 магнитов и 36 приемных камер. На рис. 3.3 представлен общий вид одного из таких рейстреков.

В окончательном виде завод электромагнитного разделения состоял из сорока пяти рейстреков первой стадии и двадцати четырех — второй стадии. Первая очередь завода была построена раньше других разделительных заводов в Ок-Ридже к ноябрю 1943 года. Установки завода занимали огромные площади, общее число работающих на нем составляло 24 тысячи человек. После того как обогащенный до промежуточных степеней обогащения уран начал поступать с других разделительных производств, он передавался на завод электромагнитного разделения, где и нарабатывались окончательные количества высокообогащенного урана.

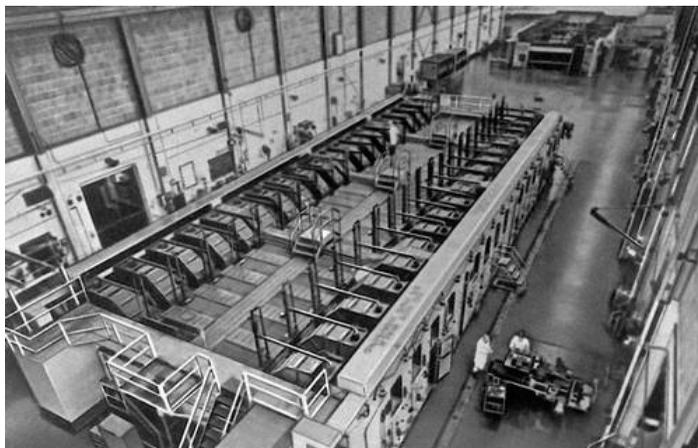


Рис.3.3. Установка электромагнитного разделения изотопов (“рейстрек”) в Ок-Ридже

## **Атомные взрывы над Японией**

В конце июля 1945 года необходимые количества урана с 90% обогащением по 235-му изотопу были переданы в Лос-Аламос непосредственным разработчикам атомной бомбы, работавшим под руководством Р. Оппенгеймера. К тому времени в пустыне Аламагордо штата Нью-Мексико 16 июля 1945 года уже было проведено первое в мире успешное испытание атомной бомбы, в качестве делящегося материала которой использовался плутоний, наработанный в ядерных реакторах завода в Ханфорде. Бомба с взрывным устройством была закреплена на вершине стальной башни высотой 30 м, вокруг нее на большом расстоянии была размещена регистрирующая аппаратура. Мощность взрыва оказалась эквивалентной мощности, выделяемой при взрыве 20 тыс тонн тринитротолуола. Такой эффект могли вызвать лишь взорванные вместе 2 тысячи самых крупных бомб времен второй мировой войны.

6 августа 1945 года бомба с взрывным устройством, изготовленным примерно из 20 кг урана-235, и с общим весом 4 т, которая имела кодовое название “Малыш”, была сброшена с самолета и взорвана над японским городом Хиросимой. Вторая бомба, начиненная плутонием, (“Толстяк ”) была взорвана 9 августа над городом Нагасаки. Человеческие жертвы и разрушения были ужасающими.

После окончания Второй мировой войны многие американцы (и среди них ряд видных ученых, участвовавших в создании ядерного оружия) чувствовали неловкость и стыд за то, что их страна положила начало гонке ядерных вооружений. Известный английский физик Патрик Блеккет заявил, например, что применение бомбы было не столько последним военным шагом Второй мировой войны, сколько первым намеренным актом холодной войны против Советского Союза. Естественно, что советское руководство в интересах безопасности собственного народа должно было ответить на этот вызов. Создание своих атомных вооружений, позволяющих обеспечить равновесие в противостоянии атомному потенциалу США, стало “проблемой номер один” для нашей страны.

*Производство расщепляющихся материалов — самый трудный момент в создании атомной бомбы. Когда страна достигает этого и успешно его осуществляет, то можно считать, что она будет обладать атомной бомбой*

Э. Теллер

## ГЛАВА 4. СОВЕТСКИЙ АТОМНЫЙ ПРОЕКТ

### Как это начиналось

Мы уже упоминали о том, что возможность практического применения ядерной энергии была осознана советскими учеными сразу же после эпохального открытия деления ядер урана. В 1939 году вопрос об этом специально обсуждался на IV Всесоюзном совещании по атомному ядру. На 1-й Всесоюзной конференции по изотопам в апреле 1940 года рассматривались проблемы разделения изотопов с помощью электромагнитного и термодиффузионного методов и получения тяжелой воды методом электролиза. В июле 1940 года в Академии наук СССР была создана комиссия по проблеме урана под руководством директора Радиевого института АН СССР акад. В.Г. Хлопина.

С началом войны против фашистской Германии вся эта деятельность была приостановлена, и по настоящему серьезное изменение отношения к урановой проблеме со стороны руководства страны возникло лишь с сентября 1942 года, когда решение о развертывании работ по урану было принято на уровне Государственного Комитета Обороны. К тому времени советской разведкой были добыты важные материалы о работах по урановому проекту, ведущихся в Великобритании. По-видимому, определенную роль в принятии этого решения сыграли и настойчивые письма в адрес руководства страны от призванного в армию лейтенанта Г.Н. Флерова (сотрудника И.В. Курчатова по предвоенным исследованиям урана, будущего академика). Во время своей служебной командировки в Казань он ознакомился в библиотеке с последними журнальными публикациями по ядерной

физике и обратил внимание на полное прекращение зарубежных публикаций по урановой проблеме, что могло свидетельствовать лишь о засекречивании этих работ в интересах военных ведомств западных стран.

В начале 1943 года после консультаций с ведущими физиками страны руководителем советского атомного проекта был назначен ученый-ядерщик и будущий выдающийся организатор атомной науки и промышленности Игорь Васильевич Курчатов. Тогда же он возглавил специально созданную Лабораторию № 2 Академии наук СССР – будущий Институт атомной энергии.

Следует заметить, однако, что несмотря на привлечение к работе ряда крупных ученых, размах работы по урановой проблеме в СССР до 1945 года не соответствовал поставленной задаче. В нашей стране атомным проектом в целом было занято немногим более 100 сотрудников, в то время как в США в этот период к участию в Манхэттенском проекте было уже привлечено около 50 тысяч человек.

Переломным годом в развитии работ по урановой проблеме стал август 1945 года, когда стало известно о первом испытании атомной бомбы в США и атомных бомбардировках в Японии. Сразу же после этих событий советским правительством был создан Специальный комитет, наделенный особыми полномочиями для решения любых проблем Уранового проекта. Была резко повышена роль и ответственность ученых и научного руководителя всей проблемы И.В.Курчатова. К концу 1945 года правительством было принято решение о немедленном развертывании работ по всему комплексу предприятий атомной промышленности.

История советского атомного проекта освещена во многих публикациях, особенно появившихся в последние годы [11-14]. Как и в случае с Манхэттенским проектом, мы уделим основное внимание лишь работе советских ученых и инженеров, связанной с проблемой разделения изотопов урана. Разумеется, о всех деталях этой колоссальной по объему и напряженной по срокам работы нельзя рассказать в рамках одной популярной книги. Интересующийся читатель может обратиться к имеющимся по этому вопросу публикациям [15-19].

## Выбор пути

Руководителями коллективов, привлеченными И.В. Курчатовым к решению проблемы разделения изотопов урана, стали будущие академики Исаак Константинович Кикоин и Лев Андреевич Арцимович. Стоит напомнить, что возраст этих ученых в то время не превышал 35 лет. Л.А. Арцимович, который был известным специалистом по электронной оптике, взял на себя работы по осуществлению электромагнитного метода разделения изотопов. И.К.Кикоин с сотрудниками провел сравнительный анализ возможностей молекулярно-кинетических методов разделения: термодиффузии, газовой диффузии и центрифугирования.

Из этих методов практически реализуемым в сравнительно короткое время оказывался, по всем оценкам, газодиффузионный метод. Вот как вспоминал об этом И.К. Кикоин:

*“Первые расчеты по диффузионному методу проводил я. Когда подсчитал первичное обогащение (по известной формуле), то получил фантастические цифры. Стало ясно, что нужно уметь делать перепад давлений на фильтрах, т.е. нужны компрессоры, и что при этом основная работа пойдет на сжатие газа. Прикинули, что процесс нужно повторять несколько тысяч раз, т.е. иметь несколько тысяч разделительных элементов (ступеней). Об этом мы с И.В. Курчатовым доложили правительству” [16].*

Здесь уместно напомнить еще об одном немаловажном обстоятельстве, которое послужило заметным толчком к выбору метода разделения изотопов. Речь идет о поступивших к тому времени по линии разведки материалах о работах по британскому атомному проекту. В марте 1943 года в комментариях к этим материалам в закрытой записке И.В. Курчатов писал: *“Предпочтение метода диффузии методу центрифугирования для наших физиков и химиков явилось неожиданным. У нас была распространена точка зрения, согласно которой возможности метода центрифугирования стоят значительно выше возможностей метода диффузии. В соответствии с этой точкой зрения в начале при постановке работ по проблеме урана*

*предусматривались исследования только с центрифугой (метод Ланге)... Таким образом, данные материалы позволяют, минуя первоначальную стадию, начать у нас в Союзе новое и весьма важное направление разработки проблемы разделения изотопов” [16].*

Уже в мае 1944 года И.В. Курчатов на основании результатов, полученных группой И.К. Кикоина, в справке, адресованной куратору атомного проекта М.Г.Первухину, заявил: “... Мы убедились, проверив врученные нам исключительно ценные материалы и сделав некоторые опыты, что диффузионные машины являются безусловно осуществимым способом получения урана-235” [14]. В 1945 году опубликование отчета Смита окончательно подкрепило позицию наших ученых, выбравших в качестве основного газодиффузионный метод разделения.

В январе 1944 года. были получены разведывательные материалы из США, в которых сообщалось, что Эрнест Лоуренс на электромагнитной разделительной установке получил несколько граммов урана-235. При этом ожидалось, что к марту 1945 года. производство обогащенного урана составит приблизительно 450 граммов в сутки. По-видимому, именно это обстоятельство подтолкнуло активный интерес Курчатова также и к этому методу разделения изотопов. Разработкой промышленных основ электромагнитного метода занялся Л.А. Арцимович, ставший в 1944 году сотрудником Лаборатории № 2.

## **Успехи и неудачи**

В июне 1944 года научный руководитель проблемы разделения изотопов И.К. Кикоин, известный математик С.Л. Соболев и один из ведущих специалистов в области гидравлических машин И.Н. Вознесенский подготовили план работ по реализации диффузионного метода разделения изотопов урана. Он включал в себя расчеты, проектирование и изготовление рабочей установки для разделения изотопов, выбор модели компрессоров для сжатия и непрерывной прокачки агрессивного рабочего газа (шестифтористого урана), разработку методов изготовления сеток

(фильтров). Предполагалось начать расчеты и эскизное проектирование завода по разделению изотопов в промышленном масштабе.

Однако, реальное промышленное освоение диффузионного метода развернулось лишь после августа 1945 года. В сентябре этого года на заседаниях Технического совета Специального комитета были рассмотрены конкретные предложения ученых лаборатории № 2 по всем основным проблемам атомного проекта, в том числе по диффузионному и электромагнитному методам разделения изотопов. В декабре 1945 года в Ленинграде при Кировском заводе и заводе Электросила были созданы два специальных опытно-конструкторских бюро (ОКБ). Главной задачей ОКБ была разработка оборудования, производящего обогащенный уран методом газовой диффузии и электромагнитным методом. Позже к разработке оборудования для газодиффузионного производства было подключено ОКБ Горьковского машиностроительного завода [15].

1 декабря 1945 года было принято решение правительства о сооружении первого газодиффузионного завода на Урале. Пуск головной части диффузионного завода (Д-1) намечался на 1 сентября 1947 года, что многим участникам проекта казалось практически нереальным. Предстояла гигантская напряженная работа коллективов ученых, конструкторов, технологов, инженеров и рабочих, которая оказалась не менее трудной по обилию сложных проблем и не менее драматичной, чем работа американцев, высокая оценка которой была дана в отчете Смита.

Основные этапы освоения газодиффузионного разделительного производства в СССР подробно освещены в книге главного конструктора ОКБ Кировского завода Н.М. Синева “Обогащенный уран для атомного оружия и энергетики” [15], выпущенной в 1992 году, а также в статьях В.И. Прусакова и, А.А. Сазыкина [16], А.М. Петросьянца [17] и Г.С. Соловьева [18]. К ним тесно примыкает вышедшая к 50-летию юбилею Уральского электрохимического комбината книга “Укрощение урана” [19]. Ниже мы воспользуемся некоторыми материалами из этих публикаций.

Сердцевинной диффузионной технологии разделения изотопов являются пористые перегородки (фильтры), собранные в хорошо уплотненные пакеты и сборки и смонтированные на напорной трассе газового центробежного компрессора. В начале 1946 года был объявлен закрытый конкурс на создание пористых фильтров. Различными группами ученых и специалистов страны было предложено несколько вариантов изготовления фильтров с нужными параметрами. В одном из них предлагалось делать фильтры из никелевых пористых пластин методом пробивки в них мелких игольчатых отверстий на специальном механическом приспособлении. Другие методы основывались на нанесении мелкой сетки на никелевую или латунную пластины с последующим точечным травлением. Наиболее удачным оказался вариант изготовления пористых пластин из мелкодисперсного никелевого порошка с последующим уплотнением массы заготовки на вибростенде и спеканием в печи, который был предложен специалистами Московского института твердых сплавов совместно с В.С. Обуховым, В.Х. Волковым, сотрудниками отдела И.К. Кикоина. Плоскими фильтрами, созданными по такой технологии, были оснащены первые диффузионные машины, на основе которых монтировались каскады первенца газодиффузионного производства – завода Д-1.

В 1948 году, с участием привлеченных к работе в Советском атомном проекте немецких ученых (П.А. Тиссен, Р. Райхман) были разработаны трубчатые фильтры двух типов: каркасные и керамические. Каркасные фильтры получали нанесением на никелевую сетку мелкодисперсного порошка из карбонильного никеля с последующим спеканием его в печи. На Кольчугинском заводе Минцветмета СССР в короткие сроки была освоена технология производства тончайшей никелевой проволоки, позволившая получать на ткацких станках сетку, имевшую 10 тыс. отверстий на  $1 \text{ см}^2$ . Керамические фильтры получались выдавливанием через кольцевой мунштук тонкостенной трубки, приготовленной из порошка закиси никеля со связующими добавками, с последующим обжигом ее в водородной печи. Трубчатые фильтры были приняты для применения на

диффузионных машинах следующего поколения, разработка которых непрерывно велась в ОКБ Кировского и Горьковского заводов. Позднее при активном участии специалистов Уральского комбината (В.А. Каржавин, Ю.Л. Голин, С.П. Чижик) были созданы трубчатые каркасные фильтры на основе никелевых порошков, легированных структурно диспергирующими добавками [19], что позволило заметно улучшить их разделительные свойства.

Конструкторами диффузионных машин был разработан специальный одноступенчатый центробежный компрессор со сверхзвуковыми скоростями движения рабочего газа (скорость звука в гексафториде урана при рабочих температурах составляет всего 85 м/с), что явилось новым словом в технических достижениях того времени. Следует сказать, что первоначальные конструкторские разработки предполагали использование многоступенчатых диффузионных машин, в которых десятков и более компрессоров центробежного типа располагались на одном валу. Каждое рабочее колесо таких компрессоров с установленным за ним пакетом плоских пористых фильтров образовывало самостоятельную разделительную ступень. Предполагаемое преимущество такой конструкции состояло в том, что при монтаже каскада таких ступеней в 20-30 раз сокращалось число агрегатов по сравнению с одноступенчатыми машинами. Однако, первые же попытки изготовить многоступенчатые машины на ЛКЗ показали технологическую сложность их серийного производства, поэтому было принято решение взять за основу одноступенчатые машины с вертикальным расположением бака делителя, в котором размещались пакеты плоских или трубчатых пористых фильтров. Как уже было известно из отчета Смита, на американском диффузионном заводе в Окридже использовались именно одноступенчатые агрегаты (с одним компрессором).

Пуску первого диффузионного завода на Урале предшествовали испытания в феврале 1947 года в Москве двух небольших каскадов из 20 одноступенчатых машин, смонтированных в экспериментальном зале отдела, возглавляемого И.К. Кикоиным, (будущий Институт молекулярной физики в составе Курчатовского научного центра). Диффузионные машины для испытаний были разработаны двумя конструкторскими коллективами и изготовлены

на Кировском и Горьковском машиностроительных заводах. Испытания показали, что каскады работают в соответствии с расчетными параметрами. При этом выяснилось, что более отработанными и приемлемыми для производства оказались в тот период машины Горьковского завода, которые и начали поставляться на строительную площадку завода Д-1.

Сложности с промышленным освоением диффузионного метода возникали на каждом шагу. Одна из них оказалась связанной с отказами в работе подшипников в электродвигателях компрессора, которые вращались со скоростью 6 тыс. оборотов в минуту. Из-за этих отказов иногда за сутки выходило из строя до 50 компрессоров. Выяснение причин неполадок и попытки их устранения заняли много времени. Было принято решение на всех машинах (а их было более 5500) заменить подшипники, обеспечив условия работы, не приводящие к их заклиниванию.

Другая драматическая ситуация возникла в июне 1949 года, когда завод был уже введен в эксплуатацию. После заполнения каскадов рабочим газом (шестифтористым ураном) обнаружилось большие потери рабочего газа по всей цепочке, которые можно было объяснить лишь химическим разложением  $UF_6$  за счет его взаимодействия с внутренними полостями диффузионных машин. Были предприняты невероятные усилия по поиску причин потери продукта. После кропотливой работы выяснилось, что “виновником” являются тонкие железные листы статора и ротора электродвигателя компрессора, на которых оседали сотни граммов порошка зеленого цвета — тетрафторида урана (продукта взаимодействия гексафторида с железом). В результате возникла необходимость замены всех электродвигателей компрессоров на так называемые “выносные” с непроницаемой керамической перегородкой.

Еще одной проблемой стало падение проницаемости пористых фильтров при их взаимодействии с агрессивной средой рабочего газа. К выяснению причин этого были привлечены лучшие силы отечественных ученых-электрохимиков. В результате для снижения потерь рабочего газа по предложению П.А. Тиссена и В.А. Каржавина были приняты специальные меры по обработке

внутренних поверхностей машин и трубопроводов нагретой фторно-воздушной смесью.

В результате напряженной работы ученых, технологов и инженеров возникшие трудности были наконец преодолены, и к ноябрю 1949 года было обеспечено первое промышленное получение продукта 75%-го обогащения по урану-235.

Следует заметить, что 29 августа 1949 года уже была испытана первая советская атомная бомба с плутониевым зарядом. Возможность использования обогащенного урана для этой цели появилась лишь к октябрю 1951 года, когда были наработаны заметные количества урана-235, обогащенного диффузионным методом до концентрации 75%. Для использования в атомном заряде необходимо было дообогащение его до 90%, которое было осуществлено на другом разделительном производстве с помощью электромагнитного метода. 18 октября 1951 года была успешно испытана советская атомная бомба РДС-3 с составным зарядом из плутония и урана-235 [12], которая впервые была сброшена с самолета.

## **Создание газодиффузионного производства в СССР**

К концу 1952 года на Уральском электрохимическом комбинате, построенном в 80 км к северу от г. Свердловска (ныне Екатеринбург) на берегу живописного Верх-Нейвинского пруда, была, наконец, обеспечена надежная эксплуатация первого в СССР газодиффузионного завода Д-1 с производством урана-235 90%-го обогащения.

После успешного пуска первенца диффузионного разделительного производства – завода Д-1 было запущено еще несколько диффузионных заводов (Д-3, Д-4, СУ-3 и Д-5) на том же Уральском электрохимическом комбинате. Каскады были оснащены теперь более производительными диффузионными машинами, начиненными трубчатыми фильтрами нового поколения. Машины, рассчитанные на самую различную производительность в зависимости от их местоположения в каскадах, производились как на Кировском заводе в Ленинграде,

так и на Горьковском машиностроительном заводе. Производство более совершенных двухслойных пористых фильтров с высокоделяющими рабочими слоями было освоено в 1958 г. в результате работы группы ученых и инженеров Уральского электрохимического комбината. Это позволило провести успешную модернизацию диффузионных машин и повысить производительность газодиффузионного производства примерно в 2 раза [18]. На рис 4.1 и цветной вкладке (рис.4.2) представлены каскад и один из блоков газодиффузионных машин, смонтированных в цехах Уральского комбината.

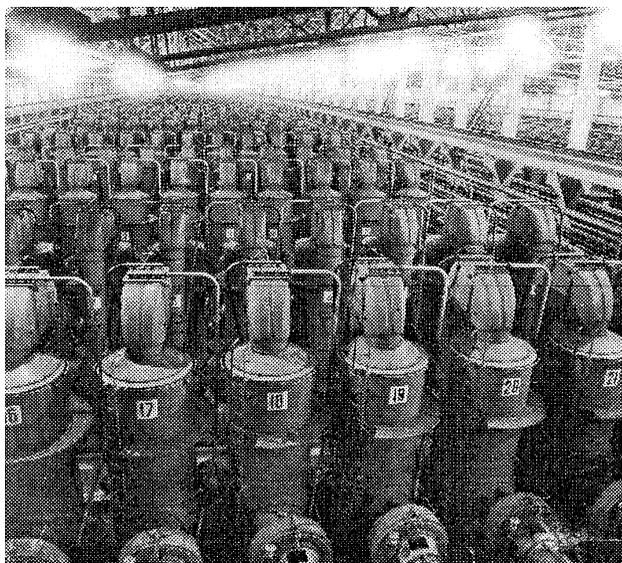


Рис. 4.1. Каскад газодиффузионных машин на Уральском электрохимическом комбинате

Внутренняя начинка делителя диффузионной машины представляет собой пакеты трубчатых пористых фильтров, соединенных трубными досками в полной аналогии со сборкой трубчатых теплообменников. Пример одной из таких сборок представлен на рис. 4.3

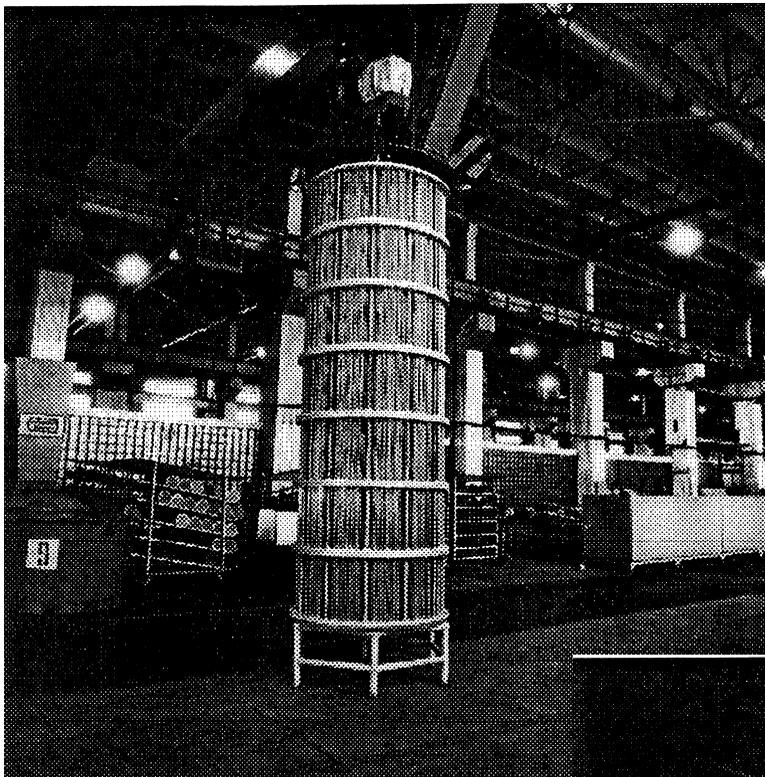


Рис.4.3 Сборка трубчатых пористых фильтров делителя

Чтобы представить себе огромные масштабы нового для нашей страны производства, отметим, что к началу 1953 года на уральских диффузионных заводах, по свидетельству Н.М. Синева [15] работало около 15 тыс. диффузионных машин. При этом общая электрическая мощность, потребляемая Уральским комбинатом, составляла около 250 тыс. кВт. К началу 1958 года комбинат потреблял уже примерно 800 МВт мощности или около 7 млрд кВтч/год, что составляло около 3% электроэнергии, производимой в СССР [16].

Аналогичные заводы возникли на комбинатах в ряде районов Сибири. В результате в 50-е годы в СССР была создана мощная газодиффузионная разделительная промышленность, которая полностью удовлетворяла потребности страны в обогащенном уране, необходимом как для атомного оружия, так и для реакторов атомных электростанций, атомных подводных лодок, исследовательских атомных реакторов. О некоторых научных проблемах, связанных с газодиффузионным методом разделения, и способах их решения мы еще расскажем в соответствующем разделе книги.

## **Установки электромагнитного разделения**

А как обстояли дела с электромагнитным методом разделения, работы по которому велись под руководством Л.А.Арцимовича? Как и в американском атомном проекте, важное место отводилось ему на заключительной стадии обогащения урана, поскольку речь шла о доведении до “высоких кондиций” количеств урана, исчисляемых уже килограммами, а не тоннами, как в диффузионных машинах. Решение этой задачи потребовало, как и у американцев, проектирования и строительства громадных электромагнитных устройств.

Благодаря исследованиям ученых были созданы пригодные для промышленных масштабов разделения изотопов источники ионов с токами ионных пучков порядка сотен миллиампер, что в десятки миллионов раз превышало ионные токи обычных масс-спектрометров.

Одновременно с вводом первого газодиффузионного завода на Уральском электрохимическом комбинате была создана и в конце 1948 года введена в действие в г. Лесной на севере Урала крупная установка СУ-20 для электромагнитного разделения изотопов урана [15, 17, 20]. Основное оборудование установки было изготовлено на ленинградском заводе «Электросила». Для размещения огромных магнитов (весом до 6 тыс. т) было построено многоэтажное здание. Размеры магнитов поражали воображение. Для сравнения заметим, что вес электромагнита циклотрона,

запущенного в лаборатории № 2 в июле 1944 года, составлял лишь 75 т. На 5 этажах здания размещались 20 камер (по 4 на каждом этаже). В каждой из камер осуществлялся процесс разделения изотопов урана. Многотонные электромагниты, мощные средства откачки больших (порядка нескольких кубических метров) вакуумных объемов, обеспечивающих поддержание вакуума на уровне  $10^{-5}$ - $10^{-6}$  тор, – все это создавалось советской промышленностью впервые и требовало огромных усилий ученых и инженеров. Для изготовления стенок камер использовалась латунь, при создании установки СУ-20 ее потребовалось в общей сложности около тысячи тонн.

По мере успехов в промышленном освоении газодиффузионного метода разделения стало ясно, что задача получения высокообогащенного урана может быть решена и без применения электромагнитного метода, который оказывался в этом случае более дорогим и неэкономичным. Для этого метода нашлась другая “ниша – разделение изотопов любых элементов от лития до урана, производство которых не требовало больших количеств получаемых веществ. При этом сам процесс осуществляется с большой кратностью обогащения в одном цикле разделения. В результате и американские, и советские электромагнитные установки были перепрофилированы на получение большого числа различных изотопов. На модернизированной установке СУ-20 было произведено более 200 обогащенных изотопов 44 химических элементов. Начиная со второй половины 50-х годов в СССР, США, Японии и странах Западной Европы началось строительство новых установок электромагнитного разделения изотопов с улучшенными характеристиками: на них были разделены изотопы более 50 элементов – от магния до свинца. Были созданы постоянно пополняемые фонды стабильных изотопов, препараты которых получили широкое применение в науке, технике и медицине.

## **А центрифуги - лучше...**

Итак, газодиффузионное разделение изотопов стало первым промышленно реализованным методом, на основе которого были

созданы мощные разделительные производства для получения высокообогащенного урана. Вместе с тем, ученым и разработчикам, участвовавшим в создании газодиффузионного производства, с самого начала были очевидны серьезные недостатки используемого ими метода. К ним, в первую очередь, относится малый коэффициент обогащения на единичной ступени, из-за чего для соединения в каскад требуется очень большое количество диффузионных машин различной производительности. Другой недостаток — высокое потребление электроэнергии в процессе разделения. Стоимость электроэнергии при эксплуатации газодиффузионного завода составляет около половины всех затрат на обогащение урана. При этом энергия расходуется в основном на сжатие газа в компрессорах, переходя в тепло, отдаваемое холодильникам.

Не случайно, что при выборе наиболее экономичного метода разделения изотопов мысли ученых и конструкторов не раз обращались к центробежному методу, использующему высокооборотные газовые центрифуги. Вспомним записку И.В Курчатова по поводу оказавшегося неожиданным для наших физиков предпочтения газодиффузионного метода центробежному в работах, которые велись в рамках уранового проекта в западных странах (см. стр. 91 ).

Преимущество метода центрифугирования перед другими газокинетическими методами разделения изотопных и газовых смесей (особенно для газов с большим молекулярным весом) выявляется сразу, как только мы знакомимся с физическими основами центробежного метода. Подробнее о физических явлениях, происходящих в центрифуге, мы поговорим чуть позже. Здесь же напомним лишь самые необходимые сведения, позволяющие понять суть вопроса.

Главная особенность центробежного метода по сравнению с диффузионным состоит в том, что первичный радиальный коэффициент разделения смеси зависит от абсолютной разности молекулярных масс изотопов, а не от их относительной разности. Кроме того, он существенно зависит от окружной скорости вращения газа. Это означает, что, изменяя скорость вращения ротора, можно управлять величиной коэффициента разделения.

Следует, впрочем, иметь в виду, что величина окружной скорости ограничена допустимыми механическими напряжениями в конструкционных материалах ротора.

Перечисленными обстоятельствами и тем, что первичный эффект разделения имеет место фактически в условиях, близких к термодинамическому равновесию (в отличие от существенной необратимости процессов в диффузионном методе), объясняется высокая экономичность и малая энергоемкость центробежного метода. Газовое центрифугирование в десятки раз уменьшает расход энергии при разделении изотопов урана и почти в сотни раз сокращает число реальных ступеней в каскаде. При этом, однако, каждая ступень из-за малой величины расхода газа в отдельной центрифуге должна содержать большое число соединенных параллельно газовых центрифуг. Поэтому в целом речь идет об огромном количестве центрифуг, вращающихся с предельно высокими скоростями и соединенных друг с другом в единый разделительный каскад.

Чем же можно объяснить тот факт, что при таких очевидных преимуществах центробежный метод разделения изотопов урана не был реализован ни в Манхэттенском проекте, ни на первом этапе Советского уранового проекта?

Известно, что ученые и технические специалисты США вначале серьезно прорабатывали возможности центробежного метода для его промышленного освоения. По свидетельству Л. Гровса [10], в январе 1943 года в рамках Манхэттенского проекта намечалось начало строительства газоцентрифужного завода. Однако первые, по-видимому, неудачные, технические решения по конструкции центрифуги, отсутствие отработанных конструкционных материалов, обеспечивающих прочность стенок при высоких скоростях вращения ротора, а также фактор времени, заставлявший спешить с производством ядерного горючего, принудили их отказаться от этого пути. Похожие проблемы возникли и у наших ученых и специалистов, что также определило первоначальный выбор в пользу диффузионного и электромагнитного методов разделения в Советском атомном проекте.

## Центрифуги Ланге и Штеенбека

Судьба распорядилась так, что создание первых образцов центрифуг в нашей стране связано с именами немецких ученых.

Работы по разделению газовых смесей с помощью центрифуг в СССР были начаты еще до войны в Харьковском физико-техническом институте в группе эмигрировавшего из Германии в 1935 году профессора Ф. Ланге. В 1941-42 годах на авиационном заводе в Уфе по его предложению была изготовлена первая опытная газовая центрифуга, на которой в 1943-44 годах производились исследования разделения модельных смесей ( $H_2$  - воздух,  $CO_2$  - воздух) в лаборатории И.К. Кикоина в г. Свердловске [21]. К сожалению, конструкция этой центрифуги была крайне неудачной, она представляла собой, вместе со вспомогательным оборудованием, громоздкое сооружение весом около 2,5 тонн. Вдоль оси ротора центрифуги проходил толстый вал, который устанавливался горизонтально в массивных колоннах на специальных подшипниках. Максимальная скорость вращения ротора составляла 10 тыс. оборотов в минуту (т.е. в десятки раз меньше того, что достигается в современных центрифугах). Осевая циркуляция газа вызывалась поддержанием разности температур вдоль образующей вращающегося цилиндра центрифуги. Естественно, что центрифуга Ланге не могла стать прототипом промышленной центрифуги для разделения изотопов урана. Несмотря на принятое в 1946 году решение о продолжении исследований в специально созданной для него лаборатории в Москве, в 1951 году эти работы были признаны бесперспективными и прекращены [16,17].

Тем не менее, интерес к возможности промышленного применения центробежного метода со стороны руководства Советским атомным проектом продолжал сохраняться и осуществлялась поддержка любых попыток, делаемых в этом направлении.

Сразу после окончания войны к работе над различными методами разделения изотопов в СССР был привлечен ряд немецких ученых (Г. Герц, Г. Барвих, М. Штеенбек, М. Арденне,

П. Тиссен) Это было вполне естественным шагом советской стороны, поскольку до войны немецкая наука имела большой опыт в проведении этих исследований. Мы уже рассказывали о немалых успехах немецких ученых в исследованиях существующих методов разделения изотопов и во время войны, когда они работали над собственным атомным проектом.

Лаборатории для привлеченных немецких ученых разместили в двух бывших санаториях г. Сухуми (Абхазия). Институт «А» в поселке Синоп (чуть южнее Сухуми) возглавил Манфред фон Арденне, в нем работали такие известные немецкие специалисты, как Макс Штеенбек, Петер Тиссен и др. Сам М. Арденне занимался исследованиями по электромагнитному методу разделения изотопов, в частности, совершенствованием разработанного им ионного источника и магнитной фокусировкой электронного пучка, а также созданием электронных микроскопов, разработкой которых он занимался еще в Германии. Руководителем института «Г», организованного на территории бывшего санатория «Агудзеры», стал лауреат нобелевской премии Густав Герц, у которого работали Г. Барвих, В. Шютце, М. Фолмер и др. В институте Герца занимались теорией каскадов (см. гл. 6), разработкой метода разделения изотопов на основе диффузии против пара, который получил потом название «масс-диффузионного метода». Профессор. Шютце разрабатывал масс-спектрометры для анализа состава газовых и изотопных смесей. Как уже отмечалось, немецкие специалисты были привлечены также к разработке пористых фильтров для диффузионного метода разделения изотопов. Всего в 1945-1955 годах в институтах «А» и «С» работало около 200 немецких и чуть меньшее число советских ученых и технических специалистов. Позже оба института стали основой для создания Сухумского физико-технического института.

В группе, работавшей под руководством немецкого ученого Макса Штеенбека, была выдвинута идея создания так называемой *надкритической центрифуги*. Первая центрифуга, предложенная Штеенбеком, представляла собой конструкцию с вертикальным ротором длиной около 9-ти метров. Ротор ее состоял из отдельных отрезков жестких труб с диаметром 60 мм и толщиной стенки порядка 1 мм, соединенных гибкими сильфонами. Предполагалось,

что такая конструкция обеспечит переход через критические обороты при разгоне центрифуги до высоких скоростей вращения (возможные разрушения валов турбин при критических частотах вращения всегда были бичом турбостроителей). Выбор небывалой длины центрифуги определялся желанием получить необходимое обогащение урана по изотопу  $^{235}\text{U}$  уже в одном цикле разделения.

По свидетельству близкого сотрудника М. Штеенбека д-ра Гернота Циппе многие ученые и инженеры, работавшие в Сухуми, с недоверием относились к конструкции Штеенбека, называя ее «вращающимся дымоходом».[22]. Она и не была практически реализована. Однако, после 6 лет напряженной работы в 1952 году группа Штеенбека удалось продемонстрировать в действии шесть трехметровых центрифуг, ротор которых был составлен из 10-ти коротких труб диаметром около 60 мм, изготовленных из легкого алюминиевого сплава, и 9-ти гибких сильфонов. Осевая циркуляция газа обеспечивалась за счет поддержания разности температур между верхней и нижней частями центрифуги. Большим достижением группы было получение достаточно высоких скоростей вращения центрифуги, частота вращения ротора которой составляла от 1200 до 1600 оборотов в секунду. При использовании в качестве рабочего газа шестифтористого урана был получен вполне приемлемый коэффициент разделения между верхним и нижним концами центрифуги [22].

К сожалению, надкритические центрифуги Штеенбека не нашли в то время дальнейшего практического приложения. В известном смысле они опередили свое время. Помимо сложностей с изготовлением самой центрифуги и обеспечением надежности ее работы, не выдерживал критики, в частности, предлагавшийся способ передачи гексафторида урана из одной центрифуги к другой через конденсацию. Вместе с тем, ряд великолепных находок Штеенбека был взят в основу будущих конструкций советских газовых центрифуг. Речь идет, в первую очередь, о предложенной им конструкции опорного узла для ротора центрифуги — тонкой стальной иглы диаметром в 1 мм на подпятнике из победита в масляной ванне. На такой опоре ротор центрифуги устойчиво

вращается подобно волчку. Верхний конец ротора удерживается при этом в вертикальном положении с помощью постоянного магнита, изготовленного в виде полого цилиндра.

## **Вперед планеты всей**

Так была названа глава в книге “Укрощение урана” [20], посвященная истории промышленного освоения центробежного метода разделения изотопов на Уральском электрохимическом комбинате, на котором в конце 1957 года был запущен первый опытный завод газовых центрифуг и в 1962-64 годах тремя очередями введен в действие первый в мире промышленный завод газовых центрифуг. Это событие, информация о котором долго сохранялась в секрете, действительно представляет собой уникальное достижение советской науки, техники и промышленности и не имеет аналогов в мире.

Создание газоцентрифужного производства по разделению изотопов урана в нашей стране стало как бы завершающим этапом в осуществлении Советского атомного проекта. Теперь информация об этом событии стала открытой, появились публикации и книги, в которых изложены история создания “русской центрифуги”, как ее называют на Западе, а также этапы организации промышленного производства центрифуг и запуска в эксплуатацию газоцентрифужных заводов по разделению изотопов. Мы не будем излагать подробности этих событий, отсылая интересующегося читателя к имеющимся публикациям [18,19, 22-25]. Остановимся лишь на нескольких весьма красноречивых фактах, относящихся к истории создания конструкции отечественной центрифуги.

Разработка конструкции первого опытного образца газовой центрифуги в нашей стране легла на плечи ученых и инженеров отделения молекулярной физики института атомной энергии им. И.В. Курчатова во главе с И.К. Кикоиным и специалистов ОКБ Ленинградского Кировского завода, возглавляемых главным конструктором Н.М. Синевым. Поскольку на начальном этапе за

основу разработок была принята центрифуга Штеенбека, в конце 1952 года М. Штеенбек вместе с двумя его сотрудниками (Г. Циппе и Р. Шеффелем) был переведен из Сухуми в Ленинград. Туда же в течение полугода были перебазированы и установлены в большом экспериментальном зале несколько трехметровых центрифуг. Очень скоро, однако, выяснилась непригодность их конструкции для промышленного изготовления и последующего использования в каскадах.

В этот же период времени в отделении акад. И.К. Кикоина разработкой центрифуги с коротким ротором занимался Е.М.Каменев, который вместе с И.К. Кикоиным высказал несколько важных идеи по конструкции подкритической центрифуги и возможности объединения их в каскад. Одновременно группой специалистов ОКБ Кировского завода (Н.М. Синев, В.И. Сергеев, Х.А. Муриinson и др.) была предложена и разрабатывалась конструкция подкритической газовой центрифуги, в которую вместе с некоторыми находками Штеенбека был также заложен ряд принципиально новых идей. Вот как прокомментировано развитие событий, предшествующих этому периоду времени, в книге М. Штеенбека [26], изданной в русском переводе в 1988 году.

*“...Осенью 1952 года мы получили извещение о нашем переводе в Ленинград... В конце 1953 года группа советских специалистов нашла оригинальное решение проблемы, остававшейся открытой еще со времен Сухуми. Речь идет об оптимальном методе соединения отдельных газовых центрифуг в один каскад .*

*Раньше о таком элегантном решении мы с фон Энгелем сказали бы с известной долей самоиронии: ” Идея, достойная того, чтобы исходить от нас “...*

*Мои новые советские сотрудники были исключительно способными, добросовестными работниками, начиненными критическими, но всегда полными смысла вопросами, т.е. во всех отношениях именно то, о чем я только мог мечтать...*

*Вместе с несколькими сотрудниками из Сухуми я передал наш опыт группе поднааторевших в производстве физиков, математиков и конструкторов, которые вскоре, используя собственные идеи в области технического применения оставили*

*позади наши результаты. Как здесь пошли дела дальше, когда я отошел от этих исследований, мне неизвестно...”*

Между тем, дела пошли очень успешно, и дальнейшее развитие событий оказалось весьма динамичным. Уже в 1954 году основные элементы конструкции советской опытной центрифуги были изготовлены и опробованы в действии, а в начале 1955 года была испытана опытная партия из 60 центрифуг.

С конца 1954 года научным руководителем разработок по газоцентрифужному методу был назначен И.К. Кикоин, а в октябре 1955 года было принято важное решение о строительстве опытного завода, состоящего из 2430 газовых центрифуг, на Уральском комбинате. Так был дан старт новой высокоэкономичной технологии разделения изотопов.

История, связанная с конструкцией короткой подкритической центрифуги на этом, однако, не закончилась. Немецкие специалисты, работавшие в течение полутора лет в составе ОКБ Кировского завода (с осени 1952 по 1954 год), имели фактически свободный доступ ко всем работам по центрифугам. В 1956 году, спустя 2,5 года после окончания работы в Ленинграде, они были отправлены домой. После возвращения в Западную Германию Г. Циппе и К.Шеппель через известную в ФРГ фирму “Дегусса” запатентовали конструкцию короткой докритической центрифуги, которая мало чем отличалась от конструкции, разработанной в СССР в 1953 году. Так появился в 1957 году патент, заявленный в 13 странах на “центрифугу Циппе”. Аналогичные права на патент, распространяющиеся в то время на страны Восточного блока, получил М. Штеенбек, возвратившийся в ГДР. Вот как прокомментировал эти события. главный конструктор ОКБ М.Н. Синев в уже упоминавшейся книге [15], изданной в 1992 году.

*«. Узнав о плагиате, тогдашнее руководство советского атомного ведомства решило на эту информацию никак не реагировать — смолчать, чтобы не дать повода для каких либо подозрений, что в СССР ведутся работы по новому прогрессивному методу обогащения урана. Пусть все считают, что СССР в числе четырех стран мира по-прежнему владеет только неэкономичным газодиффузионным методом. Такой ценой, действительно, удалось в течение 30 лет скрывать информацию о*

*промышленном развитии в СССР новой технологии в производстве обогащенного урана».*

## **Проблема получения тяжелой воды**

Наряду с проблемой разделения изотопов урана немалое место в атомных проектах ведущих стран мира заняла проблема разделения изотопов водорода и производства тяжелой воды. Интерес к этой проблеме определился уже в 1939 году, когда в результате работы группы Жолио-Кюри во Франции была показана возможность осуществления цепной ядерной реакции в смеси природного урана и тяжелой воды, используемой в качестве замедлителя нейтронов. Напомним, что во время войны немецкие ученые и специалисты под руководством В. Гейзенберга предпринимали отчаянные усилия по созданию реактора на тяжелой воде, которые сорвались из-за проблем с ее доставкой из Норвегии.

Первый исследовательский реактор на уране природного состава с тяжелой водой был пущен в США в 1944 году, т.е. через 2 года после физического пуска уран-графитового реактора Ферми. Тепловая мощность первого тяжеловодного реактора была небольшой – всего 300 квт. Критическая масса металлического урана составляла при этом 3 т, а количество тяжелой воды 6,5 т. Заметим, что количество урана в уран-графитовом реакторе Ферми при сравнимой тепловой мощности было почти в 15 раз больше (примерно 46 т) при массе чистого графита порядка 380 т.

Очевидная экономия в ядерных материалах определила большой интерес ученых и специалистов к тяжеловодному типу реакторов. В 1947 году в США был создан второй исследовательский реактор на тяжелой воде. При заметно большей тепловой мощности реактора (порядка 30 МВт) загрузка металлического урана в нем равнялась 10 т, а количество тяжелой воды в активной зоне составляло 17 т.

В нашей стране разработка и создание тяжеловодных реакторов осуществлялись под руководством академика А.И. Алиханова [11,12]. Первый такой экспериментальный реактор был запущен на территории Лаборатории №3 (будущий Институт теоретической и

экспериментальной физики – ИТЭФ) в апреле 1949 года. Промышленный тяжеловодный реактор ОК-180 был принят в эксплуатацию в ноябре 1951 года на том же комбинате «Маяк» (г. Озерск Челябинской области), где уже с июня 1948 года действовал первый уран-графитовый реактор для наработки плутония. В последующие годы в СССР наряду с уран-графитовыми реакторами были введены в строй еще несколько тяжеловодных реакторов для наработки плутония .

Проблема реакторов на тяжелой воде приобрела новый смысл по мере развития атомной энергетики и строительства большого числа атомных электростанций в различных странах мира. Известно, что для получения электроэнергии в тех реакторах, где в качестве замедлителя нейтронов используют обычную воду, тепловыделяющие элементы реактора должны содержать уран, обогащенный до 3,5 - 4 % по урану-235. Поэтому ставка на энергетические ядерные реакторы, использующие в качестве замедлителя тяжелую воду, характерна для стран, в которых нет собственных разделительных производств по получению обогащенного урана. Отметим, что для заполнения современного энергетического тяжеловодного реактора мощностью ~ 500 МВт требуется ~ 400 т тяжелой воды. Естественно, что на первый план в этом случае выдвигается проблема крупно-тоннажного производства  $D_2O$  .

Как уже отмечалось в главе 1, первым промышленным методом получения тяжелой воды стал электролиз обычной воды. Вплоть до 1940 года норвежский завод в Веморке был единственным поставщиком тяжелой воды, которую получали в качестве побочного продукта в производстве водорода. Первооткрыватель дейтерия Гарольд Юри считал этот метод наиболее простым , хотя и чрезмерно энергоемким (на производство 1 г  $D_2O$  затрачивается примерно 100 кВт-ч). В основе процесса получения тяжелой воды в электролитических ваннах лежит то обстоятельство, что выделяющийся в процессе электролиза водород содержит гораздо меньше дейтерия, чем обработанная вода. Теория процесса объясняет это рядом причин. Главной, по-видимому, является реакция так называемого изотопного обмена между молекулами

HD и H<sub>2</sub>O, для которой характерно довольно высокое значение коэффициента разделения (Понятие коэффициента разделения при изотопном обогащении будет обсуждаться нами в главе 6). На эффект разделения существенно влияют также различия в значениях констант скоростей реакции для изотопов в процессе выделения газообразного водорода на катоде, которые к тому же заметно зависят от выбранного материала катода. Играет роль также и некоторая разница в скоростях диффузии к катоду ионов молекул, содержащих разные изотопы [27].

Следует заметить, что первоначальное концентрирование тяжелой воды в электролитической ванне оказывается небольшим (с содержанием дейтерия порядка 0.08% по сравнению с 0,015 % в природной воде). Поэтому на практике воду подают лишь на несколько первых ступеней электролиза, соединенных последовательно, которые используются для получения обычного водорода. Уже на четвертой ступени содержание дейтерия в остаточной воде оказывается достаточным для применения схемы так называемого противоточного каскада (об этом понятии будет рассказано в главе 6). В этом случае выделяющийся водород сжигается, в результате чего опять получается вода, которую возвращают на нижнюю ступень каскада, тогда как остаточный раствор электролита, обогащенный дейтерием, поступает на верхнюю ступень.

Из-за высокой энергоемкости электролитического процесса производства тяжелой воды он использовался только на первых этапах Манхэттенского проекта в США, и то лишь с целью конечного концентрирования тяжелой воды из обогащенной воды, поступавшей из установки, в которой использовался другой процесс. В нашей стране электролитический метод производства тяжелой воды был налажен в 1946 году на Чирчикском электрохимическом комбинате в Узбекистане [11]. Вскоре, однако, как и в других странах, начался переход на более экономичные физико-химические методы производства тяжелой воды, основанные на других принципах.

Одним из таких методов является *ректификация* (перегонка), т.е процесс перевода обычной воды из жидкого в парообразное

состояние и обратно. Первичный эффект разделения, связанный с различием равновесных парциальных давлений паров изотопных компонентов смеси, многократно умножается благодаря организации противотока жидкости и пара в так называемых *дистилляционных колоннах*. Конденсат, образующийся в верхней части колонны, возвращается противотоком к пару, создаваемому в испарителе в нижней части колонны. Для увеличения поверхности контакта между жидкостью и паром колонны заполняются насадками, образованными из мелких элементов (размером 2-8 мм), изготовляемых из металлической проволоки или сетки, стекла или полимерных материалов. Применяют также тарельчатые колонны, когда контакт между жидкостью и паром обеспечивается барботацией пара через слои жидкости на тарелках [28,29].

В 1943-44 годах в США были построены три установки ректификации воды общей производительностью 2,4 т/мес. [28]. Каждая установка состояла из 8 колонн (восьми - ступенчатый каскад), в которых концентрация  $D_2O$  в воде повышалась от природной до 90%. Окончательное концентрирование до 99,8 % осуществлялось затем электролизом. Вскоре выяснилось, однако, что использование метода ректификации на *начальной* стадии производства тяжелой воды оказывается неэкономичным из-за больших затрат энергии на испарение воды, поэтому эксплуатация американских установок была прекращена в конце 1945 года. Вместе с тем, ректификация воды под вакуумом остается на ряде производств основным методом *конечного* концентрирования тяжелой воды. Так, в США на одном из крупнейших в мире заводов тяжелой воды в Саванна-Ривер конечное концентрирование осуществляется в пятиступенчатой системе тарельчатых колонн высотой примерно по 25 м [28]. Что касается начального концентрирования, то наиболее эффективными методами являются в этом случае химический изотопный обмен между водой и сероводородом, либо аммиаком и водородом, осуществляемые в массообменных противоточных колоннах. При этом используется, как правило так называемый метод двухтемпературного обмена, который использует зависимость коэффициента разделения от температуры. В настоящее время на

использовании этих методов базируется основная часть мирового производства тяжелой воды. Мы не будем входить в подробное обсуждение особенностей названных методов, по которым существует большой список литературы [27-30]. Добавим, что для получения дейтерия широко используется также низкотемпературная ректификация водорода, когда процесс испарения идет в области глубокого охлаждения (при температурах 20-23 К). Этот метод имеет ряд особенностей и наряду с химическим изотопным обменом находит применение для разделения изотопов ряда других легких газов: гелия, неона, азота, кислорода, а также углерода и бора с использованием их газообразных соединений [29,30].

К началу 90-х годов прошлого века общемировое производство тяжелой воды достигло уровня порядка 5000 т/год и мало меняется до настоящего времени. Львиная доля производства тяжелой воды сосредоточена в Канаде (~4000 т/год), заметные ее количества производятся в Индии, США, Аргентине и некоторых других странах. В Советском Союзе значительные объемы дейтерия производились методом низкотемпературной ректификации водорода.

## **Водородная бомба и дейтерид лития**

Наш рассказ об истории Советского атомного проекта останется незавершенным, если не упомянуть о драматическом заочном соревновании американских и советских ученых в попытках создания еще более мощного оружия массового уничтожения, чем обычная атомная бомба. Речь идет о водородной бомбе. Сама идея водородной бомбы основывается на возможности осуществления термоядерных реакций (реакций синтеза) между ядрами изотопов водорода (дейтерия и трития) при температурах порядка сотен миллионов градусов Кельвина. Энергетический эффект таких реакций уже обсуждался нами в гл. 2.

Истории создания водородной бомбы в США и СССР посвящен целый ряд публикаций, вышедших в последние годы [13,31,32].

Ниже мы воспользуемся некоторыми сведениями из этих опубликованных материалов.

В США идея водородной бомбы начала обсуждаться еще в 1942 году, когда Эдвардом Теллером и Д. фон Нейманом и значительно позднее С. Уламом (1951) было предложено несколько концепций термоядерной бомбы. Реакции синтеза инициировались в жидком дейтерий (или смеси дейтерия и трития) либо за счет потока нейтронов, либо за счет энергии излучения, возникающих в результате взрыва находящейся в отдельном узле устройства первичной урановой бомбы. Процессы, сопровождающие этот взрыв, обеспечивают необходимое повышение температуры в термоядерном узле бомбы до сотен миллионов градусов.

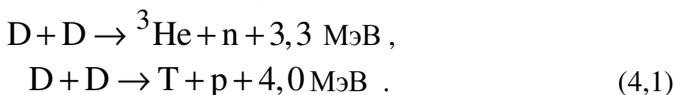
Однако начало реальному созданию американской водородной бомбы было положено лишь в 1950 году. В ноябре 1952 года в США на атолле Эниветок было взорвано термоядерное устройство «Майк» в виде куба весом 65 т, установленного на металлической башне, высотой с двухэтажный дом. В качестве термоядерного горючего применялся жидкий дейтерий.

В Советском Союзе целенаправленные исследования возможности создания водородной бомбы начались с 1946 года при активном участии Ю.Б. Харитона и Я.Б. Зельдовича. С 1948 года к этим исследованиям подключилась группа, возглавляемая академиком И.Е. Таммом, в состав которой вошли будущие академики В.Л. Гинзбург и А.Д. Сахаров. Уже в начале 1949 года А.Д. Сахаров предлагает идею так называемой «слойки» — гетерогенной конструкции из чередующихся слоев легкого вещества (дейтерий, тритий и их химические соединения) и тяжелого (уран-235). Важным дополнением к этой идее стало предложение В.Л. Гинзбурга использовать твердое химическое соединение изотопа лития  ${}^6\text{Li}$  с дейтерием (дейтерид лития), которое с легкой руки ее автора на обиходном языке его сотрудников называлось «лидочкой». Реакция  ${}^6\text{Li}$  с нейтронами оказывается источником наработки трития, который необходим для осуществления эффективной термоядерной реакции синтеза дейтерия и трития.

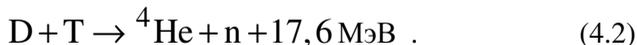
12 августа 1953 г. в СССР по схеме «слойки» был успешно испытан первый в мире реальный водородный заряд, мощность которого примерно при тех же габаритах и весе, что и первая советская атомная бомба, превышала мощность последней в 20 раз. В двух испытаниях 1955 года в СССР впервые в мире был проведен сброс термоядерных бомб с самолета. Аналогичное испытание США провели лишь на год позже. Заметим, что применение в термоядерных зарядах США дейтерида лития с высокой степенью обогащения лития изотопом  $^6\text{Li}$  также началось лишь с 1956 года [32].

Дальнейшее наращивание запасов водородного оружия в США и СССР осуществлялось на основе ряда новых идей, к которым независимо пришли ученые двух стран. Ключевой идеей явилось при этом обжатие и инициирование взрыва термоядерного узла водородной бомбы энергией излучения, создаваемого первичной атомной бомбой (принцип «радиационной имплозии»).

Остановимся коротко на основных элементарных процессах, лежащих в основе взрыва водородной бомбы — реакция термоядерного синтеза. Ядра атомов дейтерия могут вступать в реакцию синтеза по двум равновероятным каналам



Справа в схеме реакции указывается выделяющаяся в результате реакции энергия (в МэВ), которая соответствует кинетической энергии образующихся частиц. Более привлекательной с энергетической точки зрения оказывается реакция синтеза ядер дейтерия и трития



При этом из всей выделяющейся энергии 14,1 МэВ приходится на кинетическую энергию нейтронов. Эффективная скорость DT-реакции оказывается при температурах около 100 млн градусов (~ 10 КэВ ) почти на два порядка выше, чем в случае DD-реакции.

Кроме того, для эффективного протекания DD - реакции нужны энергии сталкивающихся ядер порядка 100 КэВ, т.е. температуры в 10 раз большие, чем в случае DT-реакций. Поэтому именно реакция в смеси дейтерия и трития положена в основу процесса, реализуемого в современных термоядерных устройствах. Как уже было отмечено выше, эффективным способом производства трития является его наработка в ядерной реакции



Эта реакция и послужила источником идеи В.Л. Гинзбурга об использовании дейтерида лития в конструкции водородной бомбы .

Природный литий содержит 92,7% изотопа  ${}^7\text{Li}$  и 7,3%, изотопа  ${}^6\text{Li}$ . Основной изотоп лития подавляет термоядерную реакцию, поэтому перед учеными и разработчиками водородной бомбы возникла проблема накопления изотопа  ${}^6\text{Li}$  – задача, которую могли решить только специалисты по разделению изотопов. Известно, что в СССР эта проблема решалась научными и производственными коллективами под руководством академика Б.П. Константинова. Информация об использованной при этом технологии разделения изотопов остается до сих пор недоступной. Из опубликованных данных зарубежных исследований следует (см. [30,32] ), что для достаточно крупного производства изотопа  ${}^6\text{Li}$  можно использовать изотопный обмен между его металлическим литием в виде амальгамы (т.е. его соединения со ртутью), которая при небольших концентрациях растворенного в ртути металла находится в жидком состоянии, и раствором соли лития в органическом растворителе. Использование этого метода предполагает создание колонны изотопного обмена жидкость-жидкость. При этом легкий изотоп лития концентрируется в амальгаме, а тяжелый – в растворе соли. Заметим, что литий, обогащенный более распространенным изотопом  ${}^7\text{Li}$ , находит независимое применение в качестве жидкого теплоносителя

ядерных реакторов на быстрых нейтронах, поскольку он практически не взаимодействует с нейтронами.

## Изотопы и «термояд»

На привычном жаргонном языке физиков «термоядом» называют проблему *управляемого термоядерного синтеза* (УТС).

Идея УТС заключается в том, чтобы обеспечить выделение энергии в результате реакций термоядерного синтеза изотопов водорода не взрывным путем (как в водородной бомбе), а медленно, управляемым образом. Речь идет, таким образом, о создании стационарно работающего энергетического термоядерного реактора, в котором плазма изотопов водорода, нагретая до температур порядка сотен миллионов градусов и удерживаемая при этом в замкнутой камере, обеспечивает протекание термоядерных реакций синтеза с дозированным (управляемым) выделением энергии. Энергия частиц, (главным образом нейтронов), возникающих в таких реакциях, может быть преобразована затем в тепловую и электрическую энергию подобно тому, как это происходит в современных ядерных реакторах деления.

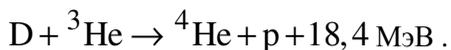
Ученые нашли и способы удержания «горячей плазмы» в термоядерном реакторе на основе идеи «магнитной термоизоляции плазмы», предложенной впервые в 1950 году А.Д. Сахаровым и его учителем И.Е. Таммом и примерно в то же время в США Л. Спитцером. Мы не будем входить в детали огромной работы, проделанной международным сообществом ученых почти в течение полувека в решении проблемы УТС. Интересное и содержательное изложение относящихся к этой теме вопросов читатель может найти в популярных книгах [33,34]. Остановимся лишь на том, что имеет непосредственное отношение к теме нашей книги.

Как уже отмечалось выше при анализе ядерных реакций синтеза, протекающих в водородной бомбе, наиболее эффективной оказывается  $D + T$  - реакция (4.2) при одновременной наработке трития по реакции (4.3). Реакция синтеза дейтерия и трития с

выходом нейтронов с энергией 14,1 МэВ оказывается энергетически наиболее привлекательной и для реализации термоядерного реактора.

Проблемы получения необходимых количеств дейтерия для термоядерной энергетики по существу нет, запасы воды на Земле неограниченны. Сложнее – с тритием. Этот изотоп водорода можно получать в ядерных реакторах, облучая тепловыми нейтронами изотоп лития  ${}^6\text{Li}$  в соответствии с реакцией (4.1). Запасов лития в природе достаточно много, некоторые сложности связаны лишь с обсуждавшейся выше проблемой выделения изотопа литий-6. Вместе с тем, тритий можно воспроизводить и в самом термоядерном реакторе. Для этого горячую зону реактора в его современных конструкциях предполагается окружать специальной литийсодержащей оболочкой – бланкетом.

Существует еще одна любопытная возможность использования изотопов легких элементов для целей УТС. Речь идет о термоядерной реакции синтеза типа



Хотя осуществление этой реакции требует примерно в 3 раза более высоких температур, чем в случае  $\text{D} + \text{T}$  - реакции, одно из важных ее преимуществ – отсутствие быстрого нейтрона в продуктах реакции. Это обстоятельство позволяет резко уменьшить наведенную радиоактивность и деградацию конструкционных материалов реактора. Важно также, что сам исходный материал (гелий - 3) в отличие от трития является нерадиоактивным. Беда в том, что изотопа гелия - 3 очень мало на Земле. В земной атмосфере его процентное содержание составляет всего лишь одну сотысячную часть от содержания гелия - 4.

Неожиданным оказалось гораздо более заметное содержание изотопа гелия - 3 в лунном грунте. Анализы образцов лунной породы, привезенных с Луны американской экспедицией «Аполлон» и советскими автоматическими космическими аппаратами, показали, что в поверхностном пылевидном слое нашего спутника (реголите) обнаруживается ~ 0,04% гелия - 3 по

отношению к гелию -4. Это соответствует тому, что 1 тонна лунного грунта содержит 0,01 г гелия - 3 и 28 г гелия - 4. В общей сложности на Луне, по оценкам акад.Э.М. Галимова, имеется до 500 млн тонн изотопа  $^3\text{He}$ . Это обстоятельство вызвало ряд многообещающих заявлений со стороны ученых и политиков ведущих стран мира о необходимости разработки конкретных проектов доставки гелия -3 с Луны для целей термоядерной энергетики. Будущее покажет, насколько реальной может оказаться эта заманчивая перспектива.

*Обогащительные производства —  
это жемчужина в короне атомной  
промышленности России.*

**Ю. М. Каган**

## **ГЛАВА 5. СОВРЕМЕННЫЕ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА**

### **Обогащение урана в России и в мире**

Итак, в сороковые-пятидесятые годы XX века в США и Советском Союзе были созданы мощные разделительные производства для получения высокообогащенного урана. Уран с 90% обогащением по легкому изотопу требовался для пополнения запасов ядерного оружия и обеспечения паритета в вооружениях, что в условиях холодной войны считалось первостепенной задачей противостоящих друг другу держав. Обогащенный уран был нужен также для обеспечения работы энергетических транспортных установок (реакторов подводных лодок и атомных ледоколов) и исследовательских реакторов. В 60-70-х годах прошлого века и до настоящего времени рост атомной энергетики в различных странах вызвал необходимость в увеличении производства слабообогащенного (до 3–4% по  $^{235}\text{U}$ ) уранового топлива, из которого изготавливаются тепловыделяющие элементы реакторов атомных электростанций.

По указанным причинам происходило непрерывное наращивание мощности разделительных производств. При этом долгое время основным производителем ядерного горючего, помимо реакторов, в которых нарабатывался плутоний, оставались газодиффузионные заводы. Так, в Советском Союзе наряду с уже действующим Уральским электрохимическим комбинатом (г. Новоуральск) в течение 1950-60-х годов были построены и введены в действие еще три комбината по производству обогащенного урана газодиффузионным методом (вблизи городов Томска и Красноярска, а также в г. Ангарске Иркутской обл.) [13,18]. В США после запуска первенца газодиффузионного производства в

Ок-Ридже (штат Тенесси), начиная с 1951 года, были построены аналогичные заводы по разделению изотопов в Портсмуте (штат Огайо) и в Падьюке (штат Кентукки). Заметное улучшение разделительных свойств пористых фильтров, усовершенствование отдельных элементов и общей схемы заводов позволяло осуществлять модернизацию газодиффузионных заводов в США и увеличивать их производительность. До сего времени газодиффузионное производство в США является основным поставщиком уранового топлива (хотя завод в Портсмуте был остановлен в 2001 году, а историческое здание диффузионного завода К-25 в Ок-Ридже вообще полностью демонтировано). Аналогичная модернизация газодиффузионных заводов, позволившая на тех же производственных площадях увеличить выпуск обогащенного урана примерно в 2 раза, происходила и в нашей стране [18].

В 1964 году был получен первый обогащенный уран на французском газодиффузионном заводе в Пьерлатте, затем был введен в действие гораздо более производительный завод в Трикастене. На цветных вкладках (рис.5.1 и 5.2) представлены типичная диффузионная ступень и элементы каскада французских диффузионных машин на заводе в Трикастене, принадлежащем компании Евродиф. В 1956 г газодиффузионный завод был запущен в Англии (Кэйпенхерст), затем он был остановлен в связи с переходом на газоцентрифужную технологию. Наконец, с использованием советского оборудования в 1960 году был пущен газодиффузионный завод близ Ханьчжоу в Китайской Народной Республике.

Успешная разработка в нашей стране высокоэкономичного и технически прогрессивного газоцентрифужного метода позволила осуществить настоящую научно-техническую революцию в разделительном производстве. В 1962-64 годах на Уральском электрохимическом заводе тремя очередями был пущен в эксплуатацию первый в мире промышленный завод по обогащению урана, оснащенный газовыми центрифугами [18]. В течение 30 лет в СССР более совершенной газоцентрифужной технологией были оснащены все четыре разделительных предприятия.

В 1992 году в России была полностью прекращена промышленная эксплуатация газодиффузионных заводов. На освободившихся производственных площадях компактно разместились каскады центрифуг. Разумеется, современные конструкции газовых центрифуг существенно отличаются от первых разработок, за прошедшие годы были разработаны восемь поколений газовых центрифуг, из которых четыре последних успешно работают до настоящего времени. Ресурс работы этих центрифуг с минимальным числом отказов составляет около 30 лет. На российских разделительных производствах начинается внедрение газовых центрифуг девятого поколения, разделительная мощность которых в 14 раз больше разделительной мощности первых центрифуг. В первую очередь, такой прирост мощности обеспечивается переходом к использованию новых композиционных материалов, способных выдерживать повышенную нагрузку при более высоких скоростях вращения ротора центрифуги. Нынешняя суммарная мощность четырех российских предприятий примерно в десять раз превышает их мощность при работе на газодиффузионной технологии, при этом удельное энергопотребление на единицу работы разделения уменьшилось в 50 раз [18].

Тот, кто хоть раз побывал на современном газоцентрифужном производстве и увидел воочию вытянувшийся почти на километр пролет цеха, в котором установлены красавцы-каскады из сотен тысяч центрифуг, надолго сохранит в памяти эту поражающую воображение картину. Трудно себе представить, что внутри каждого из этих сравнительно небольших по размерам аппаратов, объединенных в компактные группы из сотен центрифуг и закрепленных в несколько ярусов на выстроившихся друг за другом опорных колоннах, с невиданной частотой бьется сердце отдельной центрифуги и со скоростью в несколько тысяч оборотов в секунду вращается в вакууме легкий упрочненный ротор, наполненный гексафторидом урана, обеспечивая непрерывное разделение изотопов и передачу продукта по всему каскаду. На цветной вкладке (рис.5.3) представлена панорама одного из модулей центрифужного завода на Уральском

электрохимическом комбинате, которая является хорошей иллюстрацией к описанной выше картине.

Современное газоцентрифужное производство представляет собой выдающееся достижение научной и технической мысли, это поистине новая, обращенная в будущее, технология 21 века. Не случайно академик Ю.М.Каган, один из соратников И.К. Кикоина в освоении диффузионного метода разделения изотопов урана в нашей стране, назвал обогатительные производства *“жемчужиной в короне атомной промышленности России”*.

А как обстоят дела с центрифужной технологией в западных странах? Получив в 1957 году на Западе патент на короткую подкритическую центрифугу, которая, как мы уже отмечали, являлась по существу аналогом первоначального варианта центрифуги, разработанной в СССР, Г. Циппе и К. Шеффель продолжили работу по ее совершенствованию. Результатом этого явилось проектирование и запуск в 1967 году с участием ряда немецких фирм нескольких опытных каскадов подкритических центрифуг для получения урана низкого обогащения [22]. В течение нескольких лет Г. Циппе находился в США в университете Вирджиния, где демонстрировал американцам работоспособность докритических центрифуг, однако дальнейшего развития в США эта деятельность не получила. Вернувшись в Германию Г. Циппе занялся разработкой надкритических центрифуг и добился здесь определенных успехов. Внедрению надкритических центрифуг способствовал общий высокий уровень станкостроительной промышленности в Европе, особенно в Германии. В 1970 году три страны: Англия, Голландия и Германия создали объединение URENCO, имевшее целью использование имеющихся технологий создания надкритических центрифуг. Заводы, оснащенные такими центрифугами и предназначенные для производства низкообогащенного урана, были построены сначала в Алмело (Голландия) и Кейпенхорсте (Англия). В 2000 году экспериментальный каскад из примерно 2000 надкритических центрифуг был установлен на разделительном заводе в Гронау (Германия). В настоящее время объединение URENCO продолжает наращивать мощность своих центрифужных заводов за счет совершенствования уже созданных моделей центрифуг.

Последняя модификация их центрифуг имеет высоту примерно 7 м. Общая панорама газоцентрифужного завода в Кейпенхорсте и вид одного из участков центрифужного каскада завода в Гронау приводятся на цветной вкладке (рис. 5.4 и 5.5).

В США попытка реализовать программу создания газоцентрифужного производства была предпринята специалистами университета Вирджинии (вместе с несколькими американскими фирмами) на основе разработанных ими надкритических центрифуг с длиной ротора около 15 м и диаметром около 0,5 м. На эту программу было израсходовано около 3,5 млрд долларов и в 1981-83 годах построено три промышленных каскада центрифуг (около 1000 машин) на площадке Портсмутского газодиффузионного завода. Однако эксплуатация этих каскадов была прекращена в 1985 году, по-видимому, из-за недостаточной надежности конструкции столь сложных машин и высокой вероятности аварий при их работе. Большую роль в принятии этого решения сыграли и продекларированные американскими учеными достижения в успешном освоении *лазерного метода* разделения изотопов урана. К этому времени в Ливерморе на лабораторных установках по лазерному разделению изотопов в атомарных парах (метод AVLIS) было получено около пяти килограммов обогащенного урана по вполне приемлемой стоимости. На дальнейшую разработку этой технологии было затрачено затем около 2 млрд долларов.

Однако в 1999 году американская корпорация USEC на основе анализа результатов работ по лазерному методу разделения и оценки его экономической эффективности принимает очередное драматическое решение о приостановке работ по этому методу. В настоящее время в США вернулись к идее использования центрифуг для получения низко-обогащенного урана и активно ведут соответствующие исследования и разработки. По плану корпорации USEC, которая реализует проект «Американская центрифуга», на заводе в Пайктоне, (штат Огайо) должно располагаться около 11,5 тыс. машин с общей производительностью, примерно равной мощности одного из трех заводов европейского объединения URENCO. В начале 2009 г на этом заводе был введен в эксплуатацию опытный каскад из 40-50

пятиметровых надкритических центрифуг, однако ввод в действие промышленного завода центрифуг пока откладывается. Вид одного из участков опытного каскада американских центрифуг представлен на цветной вкладке (рис.5.6). В свою очередь, объединением URENCO получена лицензия Комиссии по ядерному регулированию США на строительство центрифужного завода на территории США в штате Нью-Мексико, первая очередь завода пока небольшой производительности уже запущена.

Газоцентрифужное производство развивается также в Японии, где ведутся разработки новых типов центрифуг. Уже в 2010 году запланировано начать производство обогащенного урана на центрифужном заводе, построенном в Роккасё (префектура Аомори). Центрифужные заводы имеются также в Пакистане, где использована, по-видимому, переданная нелегальным путем технология объединения URENCO. В 1997 году при участии советских специалистов была пущена первая очередь центрифужного завода в Китайской народной республике. В 2001 году новый центрифужный завод в Китае был построен на территории бывшего газодиффузионного завода в Ланьчжоу.

В Бразилии объявлено о скором пуске в эксплуатацию центрифужного завода с центрифугами собственного производства. По информации международного агентства по атомной энергии (МАГАТЕ) на строящемся центрифужном заводе в Иране в августе 2009 году был запущен каскад из 4600 центрифуг, планируется строительство еще одного завода на 3 тыс. центрифуг по технологии, заимствованной, по-видимому, в Пакистане.

Остановимся теперь на вопросе о способе сравнительной оценки эффективности разделительных предприятий по производству обогащенного урана. Уже давно для этой цели используется специальная единица измерения, которая получила название *единицы разделительной работы* (сокращенно ЕРР). В частности количеством ЕРР/год. характеризуют удельную мощность предприятий разделения по выпуску обогащенного урана. Подробнее о смысле этого параметра, следующего из теории каскадов разделительных установок, читатель может узнать,

прочитав раздел следующей главы книги под названием « Что такое ЕРР?». Воспользуемся теперь этой величиной для сравнения между собой производственных мощностей некоторых предприятий – производителей обогащенного урана в мире.

Так, по данным на 2006 год американский диффузионный завод в Падьюке (США) имел мощность 11,3 млн ЕРР/год при уровне производства 5 млн ЕРР/год [35]. Мощность действующего диффузионного завода в Трикастене (Франция) составляет 10,8 млн ЕРР/год, а на долю европейской фирмы Ugenco, объединяющей центрифужные заводы трех стран (Англия, Германия и Голландия) приходится 8,3 млн ЕРР/год. На производство не более 1 млн ЕРР/год рассчитан пока центрифужный завод в Японии. Суммарная цифра установленных в мире мощностей предприятий по обогащению урана (включая Россию) в 2006 году была близка к 50 млн ЕРР/год [35].

Единица работы разделения утвердилась также на рынке обогащенного урана при оценке его стоимости. При этом цена услуг определяется в долларах / ЕРР или в рублях / ЕРР.

В 2006 году, например, они составили 130 долларов / ЕРР [35]. Основным импортером низкообогащенного урана для атомных электростанций оказываются до настоящего времени США, причем наиболее крупным зарубежным поставщиком этой продукции для США является Россия.

Заметим, что в связи с планами строительства центрифужных заводов в США суммарная мощность планируемых к вводу в 2017-2018 годах разделительных предприятий в этой стране (при ожидаемом отказе от диффузионной технологии) должна составить от 16,2 до 18,2 млн ЕРР/год [35]. Это позволит, по-видимому, полностью обеспечить внутренние потребности США в обогащенном уране.

Что касается нашей страны, то в настоящее время она обладает самыми большими разделительными мощностями центрифужных заводов в мире. Это позволяет ей успешно конкурировать на международном рынке обогащенного урана. Так, в 2000 году

Россия поставляла на мировой рынок около 25% потребляемых в мире ЕРР [18].

Еще в 1988 году в нашей стране было принято решение о полном прекращении производства высокообогащенного урана для военных целей [18]. В 2000 году более 40% обогатительных мощностей российских предприятий по разделению урана использовались для производства топлива, применяемого в ядерных реакторах отечественных атомных станций, около 30% шло на изготовление продукции на экспорт. Остальные, примерно 30% мощностей, были рассчитаны на выполнение программы переработки высокообогащенного урана ядерных боеголовок в низкообогащенный уран для атомной энергетики (“ВОУ в НОУ” или “ Мегатонны в Мегаватты”), осуществляемой на основе контракта, подписанного Россией с США в 1993 году. со сроком действия до 2013 года [18].

## **Новые возможности центрифуг**

Успехи в освоении центробежного метода разделения изотопов урана в нашей стране поставили перед учеными и инженерами естественный вопрос о возможности применения этого метода к разделению изотопов других элементов. В 1961-62 годах академик И.К. Кикоин выступил с инициативой широкого использования газовых центрифуг для разделения стабильных изотопов самых разнообразных элементов таблицы Менделеева.

Ранее уже отмечалось, что, начиная с 50-х годов прошлого века, для получения ряда изотопов химических элементов средних и тяжелых масс периодической системы стал широко использоваться электромагнитный метод разделения. Это стало возможным после того, как промышленные электромагнитные сепараторы, созданные для разделения изотопов урана в рамках американского и советского атомных проектов, были перепрофилированы для получения изотопов других элементов таблицы Менделеева. Так, на отечественной установке СУ-20 было наработано более 200 обогащенных изотопов 44-х химических элементов. Однако невысокая производительность этого метода и значительная

стоимость получаемой изотопной продукции ограничивали его использование (особенно в тех случаях, когда получение новых изотопных материалов требовалось в заметных количествах). Поэтому разработанный российскими учеными и специалистами центробежный метод для разделения изотопов различных химических элементов составил абсолютную конкуренцию электромагнитному методу, превосходя его как по экономичности, так и по количеству производимых обогащенных материалов.

Разумеется, следует иметь в виду, что и этот метод имеет свои ограничения, поскольку применим для разделения изотопов лишь тех химических элементов, которые сами являются газами, либо имеют газообразные соединения с достаточной упругостью паров этих соединений при рабочих температурах. Полезно напомнить, что из всех известных к настоящему времени химических элементов 62 элемента имеют два и более стабильных изотопа, из них только для 39 из них известны газообразные соединения или они сами являются газами.

Естественно, что для первых экспериментов использовались серийные центрифуги, предназначенные для разделения изотопов урана. Так, для начала вместо гексафторида урана было опробовано разделение изотопов в виде гексафторидов серы, вольфрама и молибдена. В частности, в 70-х годах прошлого века на основе  $SF_6$  были получены впервые в мире изотопы серы  $^{32}S$ ,  $^{33}S$ ,  $^{34}S$  и  $^{38}S$  сверхвысокого обогащения.

Применение центробежного метода для других неурановых изотопов потребовало уже создания специальных конструкций центрифуг. Хотя общие принципы, положенные в их основу, остались прежними, перед учеными и разработчиками нового класса машин возник ряд проблем, связанных с большим разнообразием физических и химических свойств используемых рабочих веществ и со спецификой их изотопного состава. За более чем 30 лет со времени первых экспериментов в этом направлении в нашей стране были созданы около 15 типов конструкций различных центрифуг, специально приспособленных для разделения широкого спектра химических элементов, для которых

существуют подходящие газообразные соединения [25,36]. Большой вклад в их разработку внесли специалисты тех же конструкторских организаций, которые создавали первые образцы диффузионных машин и центрифуг, предназначенных для разделения изотопов урана (ОКБ Ленинградского Кировского завода и ОКБ ГАЗ). В настоящее время эти конструкторские подразделения в Санкт-Петербурге (НТЦ Центротех-ЭХЗ) и Нижнем Новгороде (ОКБ ЭХЗ) входят на правах филиалов в состав Электрохимического завода (ПО ЭХЗ, г. Зеленогорск Красноярского края), который является основным производителем широкого класса стабильных изотопов. Процесс разделения на центрифугах освоен для изотопов примерно тридцати химических элементов средней части периодической системы. Диапазон молекулярных масс химических соединений, на которых работают современные центрифуги, располагается в пределах от 30 до 410.

К настоящему времени специалисты ПО ЭХЗ освоили производство около 100 стабильных изотопов 19 химических элементов. Среди них – изотопы серы, кремния, железа, цинка, германия, селена, ксенона, криптона и некоторых других химических элементов [37]. Впервые в мире созданы уникальные технологии по производству изотопов бора и азота. При этом используются установки и каскады, содержащие от сотен до нескольких тысяч центрифуг, которые производят нужные изотопы в количестве десятков и сотен килограммов. Центробежные установки для разделения стабильных изотопов существуют также в Российском научном центре Курчатовский институт и в Российском федеральном ядерном центре в Сарове [36]. Таким образом, усилиями ученых и инженеров в современной России возникла новая самостоятельная отрасль разделительной промышленности, продукция которой занимает прочное положение на мировом рынке стабильных изотопов.

Изотопные материалы находят широкое применение в промышленности и технике, в уникальных физических исследованиях, в медицине и сельском хозяйстве. Приведем лишь несколько характерных примеров, подчеркивающих важность использования стабильных изотопов отдельных химических

элементов, нарабатываемых с помощью центробежного метода разделения.

Потребителями ряда стабильных изотопов в значительных количествах являются *ядерные реакторы и их системы*. Наиболее востребован в атомной энергетике в настоящее время изотоп бора-10. Природная изотопная смесь бора содержит два стабильных изотопа с массой 10 и 11 атомных единиц соответственно, причем концентрация более легкого изотопа в смеси составляет 19,8% ат. Изотоп бор-10 в отличие от своего собрата обладает уникальными ядерными свойствами — очень большим сечением захвата нейтронов и слабой зависимостью этого сечения от энергии нейтронов. Эти особенности делают его незаменимым материалом для изготовления стержней, регулирующих скорость ядерных процессов в реакторе. Здесь он имеет ряд несомненных преимуществ перед кадмием, который исторически первым нашел применение при изготовлении регулирующих стержней, вводимых в активную зону реактора. Реализованная на ПО ЭХЗ возможность получения высококонцентрированного бора-10 в значительных объемах на основе центробежного метода полностью решает эту задачу. Интересно, что обедненная часть продукта, т.е. концентрированный бор-11, который в противоположность легкому изотопу имеет на порядок меньшее значение сечения захвата тепловых нейтронов, может, наоборот, использоваться в реакторостроении для создания жаростойких и «прозрачных» по отношению к нейтронам конструкционных материалов. Аналогичными свойствами обладает обогащенный вольфрам-184. Оба эти материала представляют заметный интерес, например, для создания отдельных узлов так называемой «первой стенки» термоядерного реактора.

Обедненные по тому или иному изотопу изотопные продукты могут потребоваться и в других случаях. Так на внутренних стенках систем охлаждения ядерных реакторов в продуктах коррозии происходит накопление радиоактивного изотопа кобальта-60, что приводит к увеличению дозы облучения, получаемой обслуживающим персоналом. Оказалось, что уменьшить накопление этого опасного продукта можно за счет ввода в теплоноситель ионов цинка, обедненного по изотопу цинк-

64, которые вытесняют кобальт из окисных комплексов. Содержание цинка-64 в природной смеси составляет 48,6 %, На ПО ЭХЗ, а затем и в Сарове было создано производство обедненного цинка на основе центробежной технологии, которое обеспечило ежегодное его получение в количестве до сотен килограммов, что составляет около 50% мирового объема производства этого продукта. Надо заметить, что европейское объединение URENCO также приспособило свои надкритические центрифуги для производства обедненного цинка.

Значительный интерес представляет использование ряда особо чистых изотопов в *фундаментальных физических исследованиях*, связанных с физикой ядра и так называемого слабого взаимодействия частиц. Ключевым объектом физики слабых взаимодействий является *нейтрино* – частица, существование которой было предсказано в 1930 году В. Паули для объяснения нарушения закона сохранения энергии при бета-распаде ядер. В 60-х годах прошлого века эти частицы удалось зарегистрировать в реакторном эксперименте.

Один из важнейших вопросов, поставленных перед современной физикой, – это вопрос о *массе покоя* нейтрино. В стандартной теории слабых взаимодействий эта масса оказывается равной нулю (как и масса фотона). Вместе с тем, экспериментальные данные по исследованию нейтрино, полученные в последние десятилетия, показывают, что они не укладываются в рамки стандартной теории. Оценки массы различных видов нейтрино, вытекающие из этих экспериментов, позволяют по-новому взглянуть на проблему так называемой «темной материи», которая составляет большую часть массы наблюдаемой нами Вселенной и природа которой до сих пор не установлена. С нейтрино связана одна из интригующих загадок физики Солнца, а именно недостаток солнечных нейтрино по сравнению с тем, что должны бы давать термоядерные реакции, поддерживая его светимость на наблюдаемом уровне. Наконец, нейтрино могут быть подвержены очень красивому эффекту квантово-механических осцилляций: при движении в пространстве они периодически трансформируются, превращаясь из одного вида в другой. Наличие этих эффектов

неразрывно связано с представлением о конечности массы нейтрино.

Сечения слабого взаимодействия нейтрино с веществом экстремально малы. Регистрация таких редких процессов требует снижения фона экспериментов до крайне низких значений. Поэтому эксперименты проводятся, как правило, в специальных подземных лабораториях, в условиях минимального фона космических лучей и с детекторами, имеющими максимально возможную активную массу из особо чистого изотопного материала. Потребности таких «нейтринных обсерваторий» в особо чистых изотопах некоторых элементов возросли от сотен граммов на первой стадии таких экспериментов, проводившихся в 80-е – 90-е годы прошлого века, до сотен и тысяч килограммов в наше время.

В 2003 году в мире проводилось около 10 экспериментов по поиску *двойного бета-распада* различных ядер, которые позволяют из данных по так называемой безнейтринной моде оценивать массу нейтрино. Этот эффект был обнаружен при использовании  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{150}\text{Nd}$  и ряда других изотопов. Так, в эксперименте Гейдельберг – Москва было использовано около 11 кг изотопа германия-76, В новых международных проектах GERDA, MAIORANA и других требуются уже сотни килограммов этого изотопа с очень высокими требованиями к его чистоте. Значительные количества необходимых изотопов, наработанных в результате их разделения на центрифугах, начало поставлять для нейтринных телескопов, используемых в ряде российских и международных проектов, предприятие ПО ЭХЗ [37].

Последние примеры относятся к использованию изотопных материалов в *медицине*. Широкую распространенность в медицинской практике получил так называемый «дыхательный тест», используемый для диагностики желудочно-кишечных заболеваний. В этом тесте в виде «метки» используется высококонцентрированный стабильный изотоп углерод-13. По изменению содержания этого изотопа по отношению к основному изотопу углерод-12 в выдыхаемой пациентом порции воздуха можно достаточно надежно определять наличие патологии

внутренних органов. Заметим, что в США ежегодно производится около 6 миллионов таких тестов.

Долгое время для производства необходимых количеств изотопа углерод-13 в мировой практике использовалась технология низкотемпературной ректификации окиси углерода CO, которая оказывается экономически неэффективной,. В нашей стране была освоена комплексная технология производства этого изотопа, которая включает использования лазерного метода разделения для получения изотопа с концентрацией до 30% с последующим обогащением на центрифугах до 99,0% Соответствующая промышленная установка для получения CO<sub>2</sub> с концентраций до 30-40% была запущена в г. Калининграде [38]. Недавно было заявлено, что на ПО ЭХЗ освоен полный цикл получения углерода-13 на основе центробежного метода [37].

Еще один пример, относящийся к *ядерной медицине*, связан с использованием радиоактивного йода. Известно, что для диагностики и лечения некоторых заболеваний (например, опухолей щитовидной железы) широко применяется радиоизотоп йод-131, период полураспада которого составляет около 8 суток.

Медикам уже давно было ясно, что вне конкуренции для этих целей выступает радиоизотоп йод-123 с периодом полураспада 13,3 часа. Радионуклид <sup>123</sup>I может быть получен при облучении стабильного изотопа <sup>124</sup>Xe протонами в ускорителях либо  $\gamma$ -квантами в реакторе в соответствии с ядерными реакциями



Содержание изотопа ксенон-124 в природном ксеноне составляет 0,09%. Задача получения его в необходимых количествах как исходного сырья для производства радионуклида йод-123 может быть решена лишь при обогащении природного ксенона на центрифугах (электромагнитный метод в случае ксенона неприменим). Чтобы представить себе масштаб этой задачи, укажем, что для наработки десятка граммов ксенона-124 на каскаде центрифуг необходимо переработать более 11 кг природного ксенона [39].

*В любой науке столько истины,  
сколько в ней математики*

Иммануил Кант

## ГЛАВА 6. НЕМНОГО О ТЕОРИИ РАЗДЕЛЕНИЯ

В последующих главах книги мы обратимся к популярному изложению физических основ различных молекулярно-кинетических методов разделения. Но прежде чем начать такое рассмотрение, полезно обсудить некоторые общие понятия *теории разделения*. Дело в том, что ряд таких важных понятий, как коэффициенты разделения и обогащения, разделительный каскад и т.п., могут быть введены независимо от природы конкретного разделительного устройства. Это и позволяет выделить их обсуждение в отдельную главу.

Когда мы говорим об эффекте разделения изотопной газовой смеси, речь идет по существу об изменении относительного содержания (концентрации) составляющих ее компонентов после того, как она прошла разделительное устройство. Как правило, одно такое устройство в большинстве существующих методов разделения изотопов обеспечивает лишь небольшой по величине эффект разделения. Для того чтобы получить на выходе необходимое обогащение по нужному (его называют еще *целевым*) изотопу, часто приходится объединять большое число единичных разделительных устройств (ступеней) в так называемый разделительный каскад.

Важное значение теории каскадов (многоступенчатых разделительных установок) в проектировании диффузионных заводов для разделения изотопов урана было осознано учеными и инженерами еще на первом этапе американского и советского атомных проектов. Не случайно к созданию теории каскадов были привлечены лучшие силы ученых того времени. Среди них видные ученые-физики П. Дирак, Р. Пайерлс, Р. Фейнман, К.Коэн (за рубежом), а также известный математик С.Л.Соболев и физики Я.А. Смородинский, Б.В. Жигаловский, Н.А. Колокольцов и др. (в нашей стране).

## Коэффициенты разделения и обогащения

Пусть разделяемая смесь состоит из двух компонентов, причем индекс 1 относится к легкому, а индекс 2 – к тяжелому компоненту смеси. Понятия «легкий» и «тяжелый» означают, что молярные массы компонентов удовлетворяют условию  $M_1 < M_2$ . Введем определение молярной концентрации (мольной доли) первого компонента  $C$  как отношение его молекулярной плотности  $n_1$  к полной плотности смеси  $n = n_1 + n_2$

$$c = \frac{n_1}{n} . \quad (6.1)$$

Дальнейшее обсуждение для наглядности будем проводить на примере единичного разделительного элемента (ступени) каскада диффузионных машин. Это не помешает нам потом распространить вводимые понятия и на разделительные элементы, используемые в других методах разделения изотопов.

Делитель в *диффузионной машине* представляет собой цилиндрический бак, внутри которого размещены пористые фильтры в виде пучка параллельно расположенных трубок с пористыми стенками. Принципиальная схема делителя представлена на рис. 6.1. Во внутреннее пространство трубок поступает стационарный поток питания  $Q$  при давлении  $p$  и концентрации легкого компонента  $c_{вх}$ . Этот поток движется вдоль каналов и по мере продвижения часть его проникает через пористые стенки, на внешней стороне которых поддерживается более низкое давление  $p'$ .

Элементарный (первичный) эффект разделения газовой смеси на отдельной пористой перегородке (филтре) связан с тем, что молекулы легкого компонента внутри фильтра движутся с большей *направленной* скоростью, чем молекулы тяжелого, из-за чего смесь

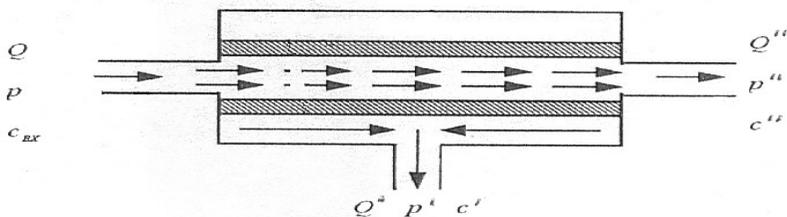


Рис.6.1. Принципиальная схема делителя

на выходе из фильтра обогащается легким компонентом. В реальном разделительном аппарате поток *обогащенной (легкой) фракции*  $Q'$  с концентрацией  $c'$  отводится через общий выход более низкого давления  $p' < p$ . Поток газа, не прошедший через фильтры, при течении вдоль каналов постепенно обедняется легким компонентом до концентрации  $c''$ , уменьшаясь от величины  $Q$  на входе до величины  $Q''$  на выходе при давлении  $p''$ , образуя поток *обедненной (тяжелой) фракции*. В стационарном режиме течения газа потоки и концентрации легкого компонента в различных фракциях удовлетворяют уравнениям материального баланса

$$Q = Q' + Q'' \quad , \quad Qc_{ex} = Q'c' + Q''c'' \quad . \quad (6.2)$$

Удобно ввести величину  $\theta = Q'/Q$ , которую принято называть коэффициентом деления потоков. Тогда второе из соотношений (6.2) можно переписать в виде

$$c_{ex} = \theta c' + (1 - \theta)c'' \quad . \quad (6.3)$$

Используя (6.3), нетрудно установить простую связь между величиной приращения концентрации легкого компонента  $\Delta c' = c' - c_{ex}$ , возникающего после прохождения смеси через

фильтры, и величиной уменьшения его концентрации при течении вдоль канала  $\Delta c'' = c_{ex} - c''$

$$\Delta c' = \frac{\theta}{1 - \theta} \Delta c'' \quad (6.4)$$

При обычно используемом делении потоков пополам ( $\theta = 0,5$ ) величины  $\Delta c'$  и  $\Delta c''$ , очевидно, равны друг другу.

Определим теперь еще несколько важных параметров. В теории разделения большое значение имеют понятия о *коэффициентах разделения* и *обогащения* смеси. *Полный коэффициент разделения*  $\alpha$  в делителе определяется как отношение относительных концентраций  $c/(1 - c)$  в обогащенной и обедненной фракциях

$$\alpha = \frac{c'/(1 - c')}{c''/(1 - c'')} \quad (6.5)$$

Коэффициент  $\alpha$  характеризует эффект разделения, достигаемый в одном разделительном устройстве (ступени), поэтому он является важной исходной величиной в теории каскада. Поскольку величина  $\alpha$  обычно мало отличается от единицы часто удобно также использовать *коэффициент обогащения ступени*

$$\varepsilon = \alpha - 1$$

Отдельно вводятся коэффициенты разделения и обогащения (обеднения) по обогащенной и обедненной фракции по отношению к исходной смеси, поступающей в делительный элемент [39,40]. В дальнейшем нас будет интересовать в основном коэффициент разделения по обогащенной фракции

$$\alpha' = \frac{c'/(1 - c')}{c_{ex}/(1 - c_{ex})} \quad (6.6)$$

Коэффициент обогащения смеси легким компонентом определяется при этом как

$$\varepsilon' = \alpha' - 1 \quad . \quad (6.7)$$

Используя определения (6.6) и (6.7), в результате несложных алгебраических преобразований легко получить соотношение, связывающее приращение концентрации по обогащенной фракции с коэффициентом обогащения  $\varepsilon'$

$$\Delta c' = c' - c_{ex} = \frac{\varepsilon' c_{ex} (1 - c_{ex})}{1 + \varepsilon' c_{ex}} \quad . \quad (6.8)$$

Для малых значений коэффициента обогащения ( $\varepsilon' \ll 1$ ), характерных для тяжелых изотопных смесей, можно приближенно записать

$$\Delta c' = \varepsilon' c_{ex} (1 - c_{ex}) \quad . \quad (6.9)$$

Полное обогащение на ступени определяется тогда выражением

$$\Delta c = \Delta c' + \Delta c'' \quad ,$$

где  $\Delta c''$  связано с  $\Delta c'$  формулой (6.4). Очевидно, при  $\theta = 0,5$  приращение концентрации в делителе  $\Delta c$  равняется просто удвоенному значению изменения концентрации по обогащенной фракции.

В рассматриваемом конкретном примере делителя диффузионной машины необходимо отличать первичный эффект разделения, возникающий на пористом фильтре (при заданных значениях давления и концентрации непосредственно перед входом в фильтр), и результирующий эффект обогащения по обогащенной фракции в делителе в целом. При расчете последнего должны учитываться уменьшение концентрации легкого компонента при прохождении потока вдоль канала по трассе обедненной фракции и падение величины потока от значения  $Q$  до

значения  $Q''$ . Учет этих обстоятельств при  $\theta = 0,5$  приводит к следующему результату (см. гл.8)

$$\Delta c' = (\Delta c)_{\phi} \ln 2 = 0,693 (\Delta c)_{\phi} , \quad (6.10)$$

где

$$(\Delta c)_{\phi} = \varepsilon_0 c_0 (1 - c_0) . \quad (6.11)$$

При этом  $\varepsilon_0$  соответствует первичному коэффициенту обогащения на фильтре, а  $c_0$  – концентрация легкого компонента перед фильтром.

Для эффекта разделения на самом пористом фильтре максимально возможное теоретическое значение коэффициента обогащения  $\varepsilon_0 = \varepsilon_m$  получается в режиме свободно-молекулярного течения газа в пористой среде и при условии, что давление за фильтром значительно меньше давления на входе в фильтр. Как будет показано в главе 8, в этом случае

$$\varepsilon_m = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} - 1 . \quad (6.12)$$

Для изотопных смесей тяжелых элементов коэффициент обогащения  $\varepsilon_m$  оказывается заметно меньше единицы. В частности, для гексафторида урана ( $M_2 = 352, M_1 = 349$ ) имеем  $\varepsilon_m = 0,0043$ . Реальное значение коэффициента обогащения на самом фильтре оказывается примерно в два раза меньше, а в делителе в целом оказывается еще меньше.

Заметим теперь, что приведенные выше общие определения и соотношения (6.5) – (6.9) справедливы для любого единичного делительного устройства независимо от его природы. Так, в случае других молекулярно-кинетических методов разделения коэффициенты  $\alpha$  и  $\varepsilon$  определяются через отношение относительных концентраций в различных пространственных областях разделительного аппарата, в которых за счет действия тех или иных механизмов разделения концентрируются обогащенные

и обедненные смеси. При разделении, например, в газовой центрифуге под первичным эффектом разделения подразумевается возникновение радиального (т.е. вдоль радиуса центрифуги) перераспределения концентраций. Элементарный (первичный) эффект обогащения соответствует при этом разности концентрации легкого компонента, взятой в области вблизи оси вращающегося ротора, и меньшей концентрации у внутренней стенки ротора, где за счет действия центробежных сил возрастает концентрация молекул тяжелого компонента. Существенно, что коэффициент обогащения в центрифуге зависит при этом просто от разности молекулярных масс компонентов смеси (а не от относительной разницы масс, как в диффузионном методе разделения), а также от окружной скорости вращения газа.

Первичный эффект разделения может быть затем многократно умножен за счет возбуждения замкнутого продольного циркуляционного течения разделяемой смеси вдоль оси центрифуги, при котором у стенки ротора и вблизи оси газ движется в противоположных направлениях. Благодаря такому противотоку возникает перенос тяжелых и легких молекул в направлении, параллельном оси центрифуги, и разность концентраций образуется между областями, расположенными вблизи верхнего и нижнего торцов аппарата.

Подобные соображения оказываются справедливыми и для других молекулярно-кинетических методов разделения (термодиффузия и масс - диффузия), где используются аппараты в виде колонн с радиальным первичным эффектом разделения.

В случае термодиффузии первичный эффект разделения возникает за счет радиального градиента температуры, а в случае масс-диффузии – из за различной скорости диффузии компонентов разделяемой смеси в поток третьего (несущего) компонента. Физика явлений, вызывающих такое радиальное разделение смеси, обсуждается в главе 9.

Сходные процессы наблюдаются и в ряде физико-химических методов разделения, где в отличие от рассмотренных выше примеров используются двухфазные системы типа газ - жидкость. Радиальный равновесный эффект разделения в дистилляционных колоннах или в колоннах изотопного химического обмена

умножается затем за счет создания встречных потоков жидкости и газа. Для дистилляционной колонны, например, это обеспечивается конденсацией пара в верхней части колонны и испарением жидкости — в нижней части (в так называемых *узлах обращения потоков*).

## **Разделительный каскад**

Как уже говорилось выше, малая величина коэффициента обогащения, которую обеспечивает одно разделительное устройство, приводит к необходимости объединения огромного числа таких устройств в так называемый *разделительный каскад*. Каждая ступень каскада может содержать один или несколько параллельно соединенных аппаратов, обеспечивающих необходимый поток разделяемого вещества через ступень. Во всех элементах такой ступени поступающая (питающая) смесь характеризуется одним и тем же изотопным составом, это справедливо также и в отношении обогащенной и обедненной фракций. Последовательное соединение ступеней, необходимое для умножения эффекта разделения и получения на выходе в отборной части обогащенного продукта, а на другом конце (в отвальной части) — обедненной смеси изотопов, и образует то, что мы называем каскадом.

Анализ показывает, что наиболее эффективной оказывается схема так называемого *противоточного каскада*, в котором обедненный поток (отвал) каждой ступени возвращается в предыдущие ступени для повторного обогащения (рис.6.2). Именно такая схема соединения ступеней, в которой питание каждой ступени образуется из отбора предыдущей ступени и отвала следующей ступени используется на диффузионных и центрифужных заводах.

Теория каскадов представляет собой довольно сложную науку [38,39]. Большое значение имеет оптимальное соединение ступеней в каскад, при котором в процессе обогащения изотопов происходит

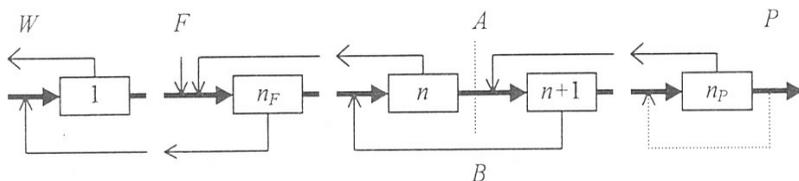


Рис. 6.2 . Схема противоточного каскада.

минимальное потребление энергии и минимальный суммарный поток газа между ступенями. Методы построения оптимальных технологических схем каскадов развивались в работах многих ученых. Исследования и расчеты показали, что всем необходимым требованиям удовлетворяет так называемый *идеальный каскад*, в котором потоки газа, соединяющиеся на входе какой-нибудь одной ступени, имеют одинаковый изотопный состав. При этом выполняется важное требование, чтобы работа при разделении смеси в ступени не терялась при смешении смеси в каскаде.

В идеальном каскаде расход газа через каждую ступень (производительность ступени) определяется изотопной концентрацией газа, поступающего в эту ступень. Поэтому величина потока обогащаемого компонента должна непрерывно меняться с изменением номера ступени, уменьшаясь от места ввода потока питания к концам секций обогащения и обеднения. Характер этого изменения представлен пунктирной кривой на рис. 6.3.

На практике реализовать полностью идеальный каскад не удается, однако можно построить реальный каскад (так называемый прямоугольно-секционированный), по своим характеристикам достаточно близкий к идеальному. В таком каскаде величина потока меняется от секции к секции уменьшаясь к “голове” и к “хвосту” каскада, но остается постоянной в пределах каждой секции (см. рис. 6.3.).

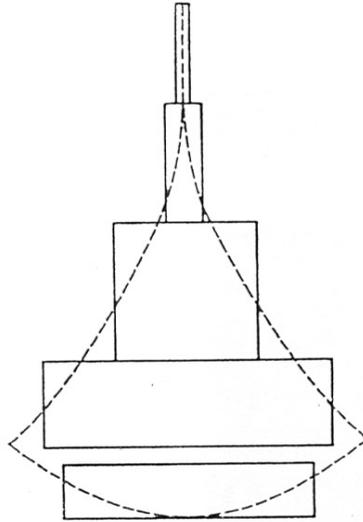


Рис.6 3. Схема каскада разделительных элементов

На отечественных диффузионных заводах по разделению изотопов урана, например, это обеспечивалось использованием 16-ти типов диффузионных машин различной производительности [18]. При этом весовой расход газа наиболее производительных машин, расположенных в секции питания, и машин, находящихся на конечной ступени отборной секции (в голове каскада), отличался в несколько тысяч раз.

С переходом к центробежному методу разделения изотопов урана задача конструирования каскадов, близких к идеальному, упростилась, поскольку каждая отдельная центрифуга имеет сравнительно малую производительность по потоку газа. В этом случае производительность ступеней, объединяемых в каскад, легко варьировать, соединяя в одной ступени разделения отдельные центрифуги параллельно друг другу.

Теория каскадов оказывается применимой не только в тех случаях, когда каскад строится из отдельных параллельно и последовательно соединенных разделительных аппаратов.

Умножение первичного радиального эффекта разделения за счет циркуляционного потока в разделительных устройствах колонного типа (термодиффузионная, масс-диффузионная, дистилляционная колонны, центрифуга) также может быть описано как своеобразный эффект каскадирования, аналогичный процессам в противоточном каскаде. При этом в большинстве случаев циркуляционные потоки можно приближенно считать постоянными по длине колонны, что соответствует частному случаю так называемого прямоугольного каскада. В качестве единичного разделительного элемента (элементарной ступени) выступает в этом случае некоторый малый по высоте цилиндрический объем газовой смеси, ограниченный радиусом колонны, к которому применимы материальные соотношения баланса, рассмотренные выше для элемента диффузионной ступени. В качестве такой элементарной ступени принимают обычно элемент разделительного аппарата с характерной длиной, равной высоте эквивалентной теоретической ступени (ВЭТС), на которой достигается продольный коэффициент разделения, равный коэффициенту разделения первичного радиального эффекта [36,41].

## **Что такое ЕРР?**

Появление развитой промышленности по разделению изотопов урана в различных странах мира сразу поставило ряд вопросов перед производителями и потребителями обогащенной продукции. Как сравнивать между собой производительность различных разделительных предприятий? Как оценивать стоимость продукта различной степени обогащения по легкому изотопу на рынке коммерческих услуг по продаже обогащенного урана? Наконец, как оценивать эффективность различных методов разделения изотопов по сравнению друг с другом? Известно, например, что мощность современных электростанций измеряют в киловаттах, а производимую ими энергию в киловатт-часах. Именно к этим величинам относят все постоянные и эксплуатационные расходы, связанные с производством электроэнергии. Можно ли ввести

подобную же единицу измерения в разделительных производствах? Ситуация здесь оказывается более сложной, поскольку кроме чисто весовой единицы (количества произведенного обогащенного урана в килограммах или тоннах) важную роль играет «ценность» обогащенного продукта, определяемая фактически той полезной работой, которая производится разделительной установкой для доведения продукта до нужной степени обогащения.

Ответ на все эти вопросы дает теория каскадов. В этой теории важную роль играют понятия *работы разделения* и *разделительной мощности*, которые впервые были введены английскими учеными Р. Пайерлсом и П. Дираком еще в период осуществления британского атомного проекта. Они предположили, что эффективность процесса разделения изотопной смеси можно характеризовать некоторой функцией  $U$ , пропорциональной количеству разделяемой смеси  $M$  и величине  $V(c)$ , названной ими *разделительным потенциалом*. При этом важной оказывается не сама функция  $U$ , а ее приращение  $\Delta U$ , которое характеризует, с одной стороны, перераспределение первоначальной массы разделяемого вещества между двумя выходными потоками, а, с другой стороны, изменение изотопного состава смеси при прохождении ее через разделительное устройство («качество смеси»). Величина такого приращения в теории каскада называется *работой разделения*. Отнесение ее к интервалу времени, в течение которого действует разделительная установка, приводит к понятию *разделительной мощности* или *разделительной способности* устройства [39].

В случае идеального каскада для малых коэффициентов обогащения на ступени ( $\varepsilon \ll 1$ ) выражение для разделительной способности ступени имеет вид [36,39]

$$\delta U = \theta(1 - \theta) \frac{Q\varepsilon^2}{2}, \quad (6.13)$$

где  $Q$  – поток разделяемой смеси (кмоль / с или кг / с),

$\theta$  – коэффициент деления потока (обычно  $\theta = 0,5$ ).  
Разделительная способность или суммарная мощность каскада в

целом определяется суммированием соответствующих величин для каждой ступени. В теории каскадов показывается, что эта суммарная величина определяется произведением *потока питания*, поступающего в каскад, и *удельной полезной работы разделения* или *разделительной работы*, необходимой для получения единицы продукта (1 кмоля, 1 кг и т.д.) Последняя величина, в свою очередь, может быть представлена как некоторая известная функция от трех внешних концентраций целевого изотопа (в потоках питания, отбора и отвала). Именно этой величиной, которая может быть точно вычислена и для которой составлены подробные таблицы, характеризуют «ценность» полученного продукта, поэтому иногда ее называют *функцией ценности*.

Использование функции ценности позволяет при известной разделительной способности отдельной ступени, определяемой выражением (6.13), найти общее число ступеней каскада, необходимое для получения нужной концентрации целевого изотопа на последней ступени отборной секции. Поскольку функция ценности  $\delta U$  пропорциональна квадрату коэффициента обогащения  $\varepsilon$ , увеличение этого коэффициента для отдельной ступени, например, в 10 раз уменьшает число ступеней в каскаде в 100 раз.

Изложенные выше представления теории каскадов позволили в свое время Комиссии по атомной энергии США предложить некоторую условную единицу измерения удельной полезной работы разделения или *единицу работы разделения* (сокращенно ЕРР), которая характеризует эффективность работы разделительных установок.

По принятому определению, 1 ЕРР или  $1\text{кг}\cdot\text{РР}$  — это работа, затрачиваемая на получение 1 кг металлического урана такого обогащения, при котором изменение «функции ценности» в процессе разделения равно единице. Можно показать, что количественно эта величина соответствует работе разделения, необходимой для получения 1 кг обогащенного урана с концентрацией 1,5 % по легкому изотопу из 2,75 кг природного сырья при заданной концентрации в отвале 0,26 % [38].

Удельную мощность или разделительную способность как разделительного каскада (завода), так и отдельного разделительного элемента (например, центрифуги) можно выражать в ЕРР, отнесенной к единице времени. Из формулы (6.13) следует, что размерность этой величины записывается как кг/с (поскольку коэффициент обогащения  $\varepsilon$  – величина безразмерная). На практике обычно используется единица 1 ЕРР/год. Разумеется, существует определенная условность в принятой единице измерения, поскольку обычная работа, например, энергетических установок измеряется в джоулях (или киловатт - часах), а мощность в киловаттах. Тем не менее, ее применение на практике полностью удовлетворяет как производителей, так и потребителей на рынке услуг по обогащению урана. Примеры использования этой величины для сравнения мощностей разделительных предприятий мира и оценки стоимости услуг по обогащению урана уже приводились нами в предыдущей главе этой книги.

*Молекулярное движение можно сравнить с толпой, где каждый человек, пройдя короткий отрезок пути, сталкивается с другим. Невозможно, однако, реально представить себе эти молекулярные числа, ведь в течение одной секунды происходит пять тысяч миллионов столкновений каждого отдельного индивида.*

Людвиг Больцман

## ГЛАВА 7. ЭЛЕМЕНТЫ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГАЗОВ

В основе любого из применяемых в настоящее время методов разделения изотопов лежит какое-либо конкретное физическое или физико-химическое явление. Некоторые из этих явлений были открыты довольно давно и имеют свою историю, о некоторых стало известно гораздо позднее. Потребовалось, однако, немалое время и особые условия в развитии науки и техники в развитых странах, для того чтобы на основе использования этих явлений возникли сначала лабораторные (стендовые) установки, а затем и промышленные заводы (каскады установок), позволившие осуществлять разделение различных изотопов в больших масштабах. О размахе этих работ и трудностях, которые преодолевались при создании мощной разделительной промышленности изотопов урана и других химических элементов мы уже рассказывали в предыдущих главах.

Сейчас перед нами стоит другая задача. В этой части книги мы попытаемся дать более или менее наглядное представление о сути физических явлений, которые лежат в основе ряда современных методов разделения изотопов. При этом основное внимание будет уделено *молекулярно-кинетическим методам разделения изотопных газовых смесей*. К ним относятся методы *газовой диффузии, термодиффузии, масс-диффузии в потоке пара*, а также *центробежный метод*.

Для понимания существа физических процессов, лежащих в основе этих методов, нам понадобятся в первую очередь некоторые сведения *из кинетической теории газов*, поэтому настоящую главу

мы посвятим элементарным основам этой теории. Хотя приводимые здесь результаты будут использованы главным образом при рассмотрении диффузионного метода разделения, некоторые из них существенны и для других молекулярно-кинетических методов разделения. Поэтому мы призываем заинтересованного читателя по возможности внимательней отнестись к излагаемому ниже материалу.

## **Закон квадратного корня**

В 1846 году английский физико-химик Томас Грэм опубликовал полученные им результаты по измерению величины потока (расхода) различных газов при их истечении в вакуум через отверстия малого диаметра и тонкие трубки. Им было обнаружено, что при относительно низких давлениях перед трубкой величина потока оказывается обратно пропорциональной квадратному корню из молекулярного веса газа (*закон квадратного корня*). В начале XX века это явление и зависимость потока через узкие длинные трубки (капилляры) от давления были детально изучены в экспериментах датского ученого М. Кнудсена. При этом выяснилось, что эффект зависимости величины потока от массы молекул оказывается наиболее выраженным в случае, когда средняя длина свободного пробега молекул в газе  $\lambda$  заметно превышает диаметр отверстия или характерный поперечный размер капилляра  $d$ .

Мы еще обратимся к понятию *средней длины свободного пробега* молекул в газе, которая зависит от так называемого поперечника рассеяния или эффективного диаметра молекул и оказывается тем больше, чем меньше давление газа. Пока же отметим, что режимы течения газа в каналах принято характеризовать отношением средней длины свободного пробега  $\lambda$  к диаметру канала  $d$  или так называемым *числом Кнудсена*  $Kn = \lambda/d$ . В случае пористой перегородки, которую можно представить себе как совокупность огромного числа извилистых каналов, соединяющих между собой различные поры, роль

характерного поперечного размера канала играет гидравлический радиус пор  $r_g$ , о смысле которого мы скажем чуть позже.

Большим значениям числа Кнудсена ( $Kn \gg 1$ ) соответствует так называемый *свободно-молекулярный* или *кнудсеновский* режим течения газа, в этом случае молекулы при своем движении сталкиваются в основном со стенками канала и практически редко друг с другом. Именно в этом режиме течения и проявляет себя в первую очередь закон квадратного корня.

Течение газовой или изотопной смеси в канале в этих условиях может рассматриваться как независимая *кнудсеновская диффузия* компонентов смеси под действием разности парциальных давлений компонентов на концах канала. Напомним, что парциальным давлением называется давление каждого из компонентов смеси, которое не зависит от того, какое давление оказывают на стенки остальные компоненты. В соответствии с законом Дальтона давление смеси газов равно просто сумме парциальных давлений ее компонентов.

*Направленные* скорости движения молекул компонентов смеси в канале в кнудсеновском режиме течения оказываются различными, поскольку зависят от массы молекул. Благодаря этому происходит накопление более легких молекул в объеме, присоединенном к концу капиллярной трубки (или на выходе из пористой среды), т.е. обогащение смеси легким компонентом (*эффект разделения*). По мере уменьшения числа Кнудсена, что соответствует росту давления или переходу к более широким каналам, начинают играть роль столкновения молекул друг с другом, что приводит, как мы увидим ниже, к уменьшению относительной скорости направленного движения молекул различных компонентов и, тем самым, к снижению эффекта разделения.

Заметим, что когда мы говорим о *направленной* скорости движения, то имеется в виду средняя скорость “организованного” движения частиц, которое накладывается на их беспорядочное (хаотическое) тепловое движение, которое всегда имеет место в газе. Средняя кинетическая энергия именно такого хаотического движения молекул определяет, как известно, температуру газа.

## Основные понятия кинетической теории газов

Закономерности течения и диффузии газов в каналах при низких давлениях газа (в частности, закон квадратного корня) находят простое объяснение в кинетической теории газов.

На самом деле, строгая кинетическая теория газов является довольно сложной наукой. Основы ее были заложены еще в XIX веке классическими трудами Джеймса Клерка Максвелла и Людвиг Больцмана. Максвеллу, в частности, принадлежит заслуга установления *закона распределения молекул газа по скоростям*. С помощью полученной им функции распределения можно определять относительную долю молекул, скорости которых лежат в некотором узком интервале значений. Использование максвелловского распределения по скоростям позволяет вычислить такие важные характеристики газа, как *средняя, среднеквадратичная и наиболее вероятная* скорости теплового движения молекул, рассчитать число столкновений молекул со стенкой и определить давление газа на стенки сосуда, связанное со средней передачей импульса молекул стенке.

При этом выясняется одно удивительное обстоятельство. Многие из этих результатов можно получить с помощью довольно простых рассуждений элементарной кинетической теории газов, в итоге которых получается, как правило, качественно верный ответ. Применение более строгой кинетической теории часто позволяет лишь уточнить численные коэффициенты в найденных выражениях. По этой причине мы попытаемся получить необходимые нам формулы, не прибегая к сложным расчетам.

### *Уравнение состояния*

Полезно напомнить сначала некоторые общие понятия и уравнения молекулярно-кинетической теории газов, которые в основном известны из школьного курса физики.

Разреженный (идеальный) газ состоит из огромного числа молекул, которые хаотически движутся в различных направлениях

с высокими скоростями. Так, для молекул азота в воздухе средняя тепловая скорость молекул при температуре  $t = 20^\circ\text{C}$  равна примерно  $470 \text{ м/с}$ . Эта скорость сравнима со скоростью звука при этих условиях, которая равна  $340 \text{ м/с}$ .

Молекулы газа испытывают многочисленные столкновения друг с другом. В результате каждого из таких столкновений происходит резкое изменение направления и величины скорости молекул. Для газа, находящегося в замкнутом сосуде, результатом столкновений молекул между собой и со стенками сосуда является установление теплового равновесия: давление и температура во всех местах внутри сосуда будут одинаковыми. Состояние теплового равновесия характеризуется также вполне определенным (максвелловским) распределением молекул по скоростям во всех частях сосуда.

Давление  $p$  [ $\text{Н/м}^2$ ], объем  $V$  [ $\text{м}^3$ ] и абсолютная температура идеального газа  $T[\text{К}] = 273 + t^\circ\text{C}$  связаны так называемым уравнением состояния

$$pV_m = RT \quad (7.1)$$

Уравнение (7.1) записано для одного моля газа, поэтому  $V_m$  – мольный объем, а  $R = 8,31 \text{ Дж/мольК}$  – универсальная газовая постоянная. Напомним, что *молем* называется количество вещества, масса которого в граммах равна молекулярной массе газа  $M$ . Так, для азота ( $\text{N}_2$ )  $M = 28 \text{ г/моль} = 0,028 \text{ кг/моль}$ . Один моль любого вещества содержит, как известно, одно и то же число молекул, равное числу Авогадро  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ .

Перепишем (7.1) в виде

$$p = \frac{N_A}{V_m} \frac{R}{N_A} T$$

или

$$p = n \frac{R}{N_A} T = nkT \quad , \quad . \quad (7.2)$$

где  $n$  – плотность газа [ $\text{м}^{-3}$ ] ( число молекул в единице объема),  $k = R/N_A = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана. Используя формулу (7.2), легко подсчитать, что при нормальных условиях ( $p = 1 \text{ атм} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ,  $T = 273 \text{ К}$ ) в одном кубическом сантиметре газа содержится  $2,7 \cdot 10^{19}$  частиц (число Лошмидта). Уравнением состояния разреженного газа в форме (7.2) мы будем не раз пользоваться в дальнейшем.

### ***Число столкновений молекул со стенкой***

Найдем теперь важную для дальнейшего обсуждения величину, а именно: определим среднее число столкновений молекул, происходящих за единицу времени с единицей поверхности стенки сосуда. Выделим в газе три взаимно перпендикулярные оси, соответствующие декартовой системе координат. Если в сосуде содержится  $N$  молекул, то из-за огромного их числа логично предположить, что в любой момент времени вдоль каждого из направлений будут двигаться примерно  $N/3$  молекул. Очевидно, что в направлении самой стенки сосуда перпендикулярно к ней будет в среднем двигаться  $1/6$  часть всех молекул.

Выделим на стенке сосуда плоский элемент поверхности  $\Delta S$ . Предположим для простоты, что все молекулы движутся с одинаковой скоростью  $v$ . Тогда за время  $\Delta t$  до элемента стенки  $\Delta S$  долетят все движущиеся по направлению к ней молекулы, которые заключены в объеме цилиндра с основанием  $\Delta S$  и высотой  $v\Delta t$  (рис. 7.1). Если  $n$  – число молекул в единице объема, то число молекул, долетевших до стенки и ударившихся об нее, равно  $(n/6)\Delta S v \Delta t$ . Соответственно, число ударов молекул об единичную площадку в единицу времени оказывается равным

$$v_{cm} = \frac{1}{6} nv. \quad (7.3)$$

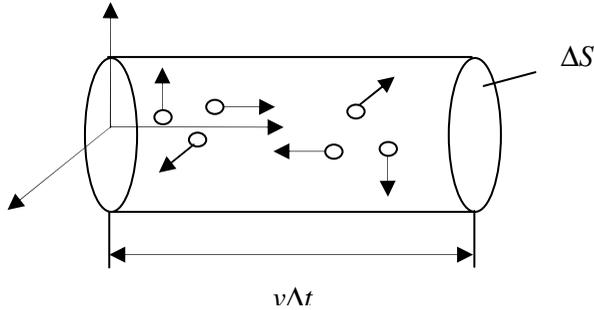


Рис. 7.1. К расчету числа столкновений молекул со стенкой

На самом деле, в этом расчете можно отказаться от предположения об одинаковой скорости молекул, выделив независимые группы молекул, каждая из которых имеет свою приблизительно одинаковую скорость. В конечном результате это приведет к тому, что скорость  $v$  заменится на среднюю по всем группам молекул скорость  $\langle v \rangle$ . Таким образом, окончательно

$$v_{cm} = \frac{1}{6} n \langle v \rangle. \quad (7.4)$$

Для того чтобы прояснить смысл *средней тепловой скорости молекул*, продолжим наши рассуждения с целью получения выражения для давления газа в сосуде  $p$ . Каждая молекула, летящая к стенке, при столкновении с ней передает стенке свой импульс. Поскольку скорость молекулы при упругом столкновении со стенкой меняется на обратную (от величины  $v$  до  $-v$ ), величина передаваемого импульса равна  $2mv$ . Сила, действующая на поверхность стенки  $\Delta S$  за время  $\Delta t$ , определяется величиной полного импульса, передаваемого всеми молекулами достигнувшем стенки за этот промежуток времени, т.е.  $F = 2mv_{cm}\Delta S / \Delta t$ , где  $v_{cm}$  определено выражением (7.3). Для

величины давления  $p = F / \Delta S$  в этом случае получаем  $p = (1/3)nmv^2$ . Средняя величина давления находится усреднением квадрата скорости по всем группам молекул или

$$p = \frac{1}{3}nm\langle v^2 \rangle . \quad (7.5)$$

Если сравнить это выражение с уравнением состояния газа (7.2), то легко заметить, что средняя кинетическая энергия молекул газа определяется выражением

$$E_k = \frac{m\langle v^2 \rangle}{2} = \frac{3}{2}kT . \quad (7.6)$$

Мы приходим, таким образом, к известному определению абсолютной температуры газа, связывающему ее со средней кинетической энергией молекул  $E_k$ .

Из этого соотношения следует также выражение для средне-квадратичной скорости молекул

$$\langle v \rangle_{ср.кв.} = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} , \quad (7.7)$$

где используются очевидные соотношения  $R = N_A k$  и  $M = N_A m$ .

Если в выражении (7.4) положить  $\langle v \rangle$  равным  $\langle v \rangle_{ср.кв.}$ , то

$$v_{cm} = \frac{1}{6}n\sqrt{\frac{3RT}{M}} = 0,289n\sqrt{\frac{RT}{M}} . \quad (7.8)$$

На самом деле, конечно, приравнивая эти средние скорости, мы поступаем не вполне корректно. Более того, точный кинетический расчет, учитывающий максвелловское распределение молекул по скоростям и то, что молекулы падают на стенку под разными углами, дает результат

$$v_{cm} = \frac{1}{4} n \langle v \rangle, \quad (7.9)$$

где  $\langle v \rangle = \sqrt{8RT / \pi M}$  – средняя тепловая скорость молекул.

В этом случае

$$v_{cm} = 0,399n \sqrt{\frac{RT}{M}}. \quad (7.10)$$

Как видно, наш результат (7.8), полученный элементарным путем, отличается от точного результата (7.10) (за счет числового множителя) примерно на 30%. Любопытно, что выражения для давления (7.5) и среднеквадратичной скорости (7.7) при этом фактически совпадают с их точными определениями.

Далее мы будем применять выражение (7.9). Используя уравнение состояния (7.2), можно переписать это выражение в виде

$$v_{cm} = \frac{N_A}{\sqrt{2\pi RT}} \frac{p}{\sqrt{M}}. \quad (7.11)$$

Самым важным для нас является вывод о том, что среднее число столкновений молекул со стенкой пропорционально давлению газа в сосуде и обратно пропорционально квадратному корню из молярной массы газа.

### ***Средняя длина свободного пробега молекул***

Поставим теперь конкретный вопрос: каким должен быть характерный диаметр канала и давление на входе перед ним, для того чтобы обеспечить свободно - молекулярный режим течения газа в канале? Для этого необходимо уточнить смысл понятия о *средней длине свободного пробега молекул*  $\lambda$ . Как уже говорилось, каждая молекула в газе испытывает очень большое число столкновений с другими молекулами. В промежутке между столкновениями молекулы движутся практически прямолинейно, испытывая резкие изменения скорости лишь в момент самого столкновения. Естественно, что длины прямолинейных участков на

пути молекулы могут быть различными, поэтому имеет смысл говорить лишь о некоторой средней длине свободного пробега молекул. За время  $\Delta t$  молекула проходит сложный зигзагообразный путь, равный  $\langle v \rangle \Delta t$ . Изломов траектории на этом пути столько, сколько произошло столкновений. Пусть  $Z$  означает число столкновений, которое испытывает молекула в единицу времени. Средняя длина свободного пробега равна тогда отношению длины пути  $\langle v \rangle \Delta t$  к полному числу столкновений  $Z \Delta t$ , испытанных молекулой на этом пути,

$$\lambda = \frac{\langle v \rangle \Delta t}{Z \Delta t} = \frac{\langle v \rangle}{Z} . \quad (7.12)$$

Задача сводится, таким образом, к определению величины  $Z$ , поскольку, как мы увидим ниже,  $Z \sim \langle v \rangle$  и знание самой средней скорости не является необходимым.

Для оценки величины  $Z$  воспользуемся простыми соображениями. Будем считать, что молекулы представляют собой твердые упругие шарики радиуса  $a$ , которые равномерно распределены в объеме газа с плотностью  $n$ . Предположим вначале, что молекула движется в среде, где все остальные молекулы неподвижны. Легко заметить, что молекула пролетает мимо другой молекулы, не испытав столкновения с ней, если расстояние между центрами молекул превышает  $2a$ . Следовательно, за время  $t$ , равное  $1c$ , молекула будет взаимодействовать только с теми партнерами по столкновению, центры которых расположены в объеме цилиндра длиной  $\langle v \rangle$  и с площадью основания  $\sigma = 4\pi a^2$  (рис.7.2).

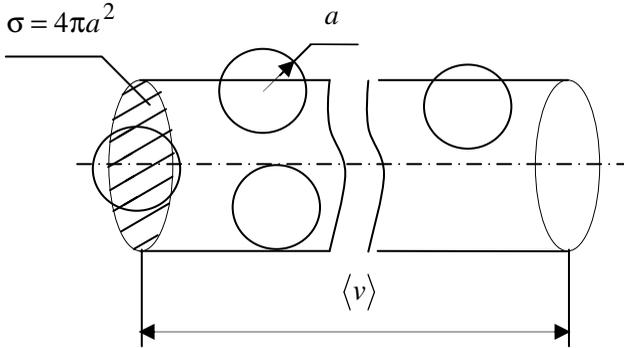


Рис. 7.2. К расчету средней длины свободного пробега молекул

Величину  $\sigma$  называют эффективным поперечным сечением столкновений молекул. Число молекул в объеме цилиндра равно  $n\langle v \rangle\sigma$ . Таким же будет число столкновений, т.е.  $Z = n\langle v \rangle\sigma$ . Используя (7.12), находим

$$\lambda = 1/n\sigma.$$

На самом деле, конечно, в газе одновременно находятся в движении все молекулы, поэтому в выражение для  $Z$  должна входить средняя скорость относительного движения молекул, так что  $Z = n\langle v \rangle_{\text{отн}}\sigma$ . Более точный расчет показывает, что  $\langle v \rangle_{\text{отн}} = \sqrt{2}\langle v \rangle$ . В результате приходим к известной в элементарной кинетической теории формуле

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}n\sigma} = \frac{kT}{4\sqrt{2}p\pi a^2}. \quad (7.13)$$

Характерный радиус молекул для различных газов можно оценить из экспериментальных данных по *вязкости* (внутреннему трению) в газе. Для молекул  $N_2$ , например,  $a \approx 1,9 \cdot 10^{-10}$  м, для молекул  $UF_6$   $a \approx 3,2 \cdot 10^{-10}$  м. В таблице 7.1 приведены рассчитанные по формуле (7.13) значения  $\lambda_0$  в мкм (1 мкм =  $10^{-6}$  м)

для ряда газов при нормальных условиях ( $p = 1 \text{ атм}$ ,  $T = 273 \text{ К}$ ). Для оценки средней длины свободного пробега при других давлениях и температурах можно воспользоваться соотношением

$$\lambda = \lambda_0 \frac{1}{p} \frac{(273 + tC)}{273}, \quad (7.14)$$

где давление  $p$  измеряется в атмосферах.

Таблица 7.1

Средняя длина свободного пробега молекул при нормальных условиях для различных газов

Газ	He	Ar	N <sub>2</sub>	UF <sub>6</sub>
$\lambda_0$ , мкм	0,19	0,07	0,06	0,02

Из приведенных в таблице данных следует, что для режима течения газа в канале, близкого к свободно – молекулярному ( $Kn \geq 10$ ) при нормальных условиях, диаметр канала должен удовлетворять условию  $d \leq 0,1\lambda_0$ , т.е. быть меньше чем  $6 \cdot 10^{-3}$  мкм для N<sub>2</sub> или меньше чем  $2 \cdot 10^{-3}$  мкм для UF<sub>6</sub>. Если диаметр канала превышает эти значения, другой способ, обеспечивающий свободно-молекулярный режим течения, состоит в том, чтобы понизить давление перед входом в канал по сравнению с атмосферным.

## Поток газа в капилляре и пористой среде

Представим себе два объема  $V$  и  $V'$ , разделенные “ситом” – тонкой перегородкой с множеством отверстий малого диаметра (рис. 7.3). Объемы заполнены газом при разных давлениях по обе стороны перегородки ( $p_0 > p'$ ).

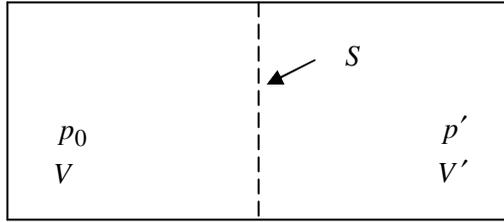


Рис. 7.3. К расчету потока частиц газа через сито с отверстиями

Если выполнены условия, обеспечивающие свободно-молекулярный режим течения газа через отверстия, то число частиц, проникающих из объема  $V$  в объем  $V'$  в единицу времени (поток частиц) через каждое из отверстий, равно числу частиц  $\langle v \rangle$ , падающих за то же время на единицу поверхности, умноженному на площадь отверстия  $S$ , или

$$J = \frac{1}{4} n_0 \langle v \rangle S = \frac{N_A}{\sqrt{2\pi RTM}} p_0 S .$$

Поскольку при этих условиях частицы, проникающие в объем  $V$  из объема  $V'$ , не взаимодействуют с другими молекулами внутри отверстия, встречный поток молекул  $J'$  будет определяться тем же выражением с заменой  $p_0$  на  $p'$ . Результирующий поток частиц через отверстие в кнудсеновском режиме течения  $G_K$  [ $\text{с}^{-1}$ ] записывается тогда как

$$G_K = J - J' = \frac{N_A}{\sqrt{2\pi RTM}} S \Delta p , \quad \Delta p = p_0 - p' . \quad (7.15)$$

Если определять поток в [ $\text{моль} \cdot \text{с}^{-1}$ ], то полный расход газа через перегородку, содержащую  $K$  отверстий, равен

$$Q_K = \frac{1}{\sqrt{2\pi RTM}} K S \Delta p . \quad (7.16)$$

Тонкая перегородка с отверстиями может рассматриваться лишь как самая простая модель пористого фильтра. Более реальными оказываются модели, в которых пористая среда представляет собой набор узких прямолинейных капилляров круглого сечения или блок плотно упакованных шаров малого диаметра. Для простоты мы ограничимся обсуждением первой из этих моделей. В этом случае нас будет интересовать выражение для кнудсеновского потока газа  $G_K$  через протяженный цилиндрический капилляр длиной  $\ell$  и диаметром  $d = 2r$  ( $d \ll \ell$ ). Для того чтобы получить это выражение, мы воспользуемся способом, который носит название *метод баланса импульса*.

Рассмотрим небольшой объем капиллярной трубки длиной  $\Delta x$  и площадью поперечного сечения  $\pi r^2$ , где  $r$  — радиус капилляра (рис. 7.4). При движении газа в капилляре возникает падение давления, которое на участке  $\Delta x$  равно  $\Delta p$ . Сила, действующая на выделенный объем газа равна, очевидно,  $\pi r^2 \Delta p$ . Эта сила уравнивается величиной импульса, который по третьему закону Ньютона передается газу за счет взаимодействия молекул со стенкой. Будем предполагать (это находит подтверждение на опыте), что молекулы, падающие на стенку, испытывают в основном так называемое “диффузное” отражение. Это означает, что молекула сначала адсорбируется (поглощается) поверхностью стенки, а затем испускается в произвольном направлении. При этом происходит полная потеря направленной скорости молекулы вдоль стенки  $u$ . Средняя величина импульса передаваемого единице поверхности стенки равна произведению импульса направленного движения молекул  $mu$  на число столкновений молекул со стенкой  $v_{cm} = n\langle v \rangle / 4$ . Учитывая, что поверхность кольцевого элемента трубки равна  $2\pi r \Delta x$ , можно записать уравнение баланса импульса в виде

$$\pi r^2 \Delta p = mu(n\langle v \rangle / 4) 2\pi r \Delta x \quad . \quad (7.17)$$

Выражая отсюда  $u$ , для потока частиц  $G_K = nuS$  [с<sup>-1</sup>] через сечение капилляра получаем

$$G_K = \frac{\pi}{4} r \langle v \rangle \frac{\Delta n}{\Delta x} S, \quad S = \pi r^2. \quad (7.18)$$

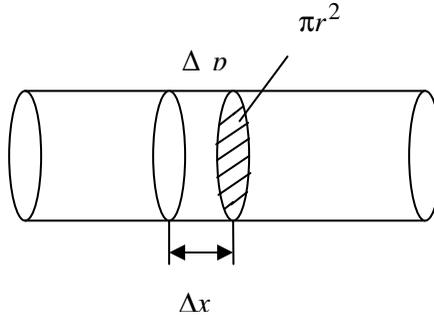


Рис. 7.4. К записи уравнения баланса импульса

Более точное выражение, отличающееся только численным коэффициентом, было получено впервые еще в начале XX века в работах Смолуховского и Кнудсена и имеет вид

$$G_K = \frac{2}{3} r \langle v \rangle \frac{\Delta n}{\Delta x} S. \quad (7.19)$$

Для полного расхода газа  $Q_K$  [моль·с<sup>-1</sup>] через перегородку, образующую набор из  $K$  капилляров, имеем

$$Q_K = \frac{1}{\sqrt{2\pi RTM}} \frac{4d}{3\ell} KS\Delta p. \quad (7.20)$$

По сравнению с потоком газа (7.16) через тонкую перегородку с отверстиями расход газа существенно уменьшается благодаря множителю  $(4d/3\ell)$ , поскольку  $d \ll \ell$ . Это связано с тем, что молекулы, входя в протяженный канал (трубку), испытывают многочисленные столкновения со стенками канала, что создает заметное сопротивление потоку газа.

Метод баланса импульса можно применить и для расчета кнудсеновского потока в *однородной и изотропной пористой среде*. Геометрические характеристики такой среды одинаковы в каждом малом объеме и во всех направлениях. Их принято характеризовать пористостью  $\delta$  и удельной поверхностью  $S_0$ . Пористостью называют безразмерное отношение, равное объему пор в единице объема среды, а удельной поверхностью  $S_0$  [м<sup>-1</sup>] – отношение полной внутренней поверхности пор к объему среды. Пористость  $\delta$  имеет также смысл отношения открытой для потока площади пор, приходящейся на единицу площади перегородки.

Если записать теперь уравнение баланса импульса для элементарного объема среды толщиной  $\Delta x$  в виде (7.17), заменяя  $\pi r^2$  на  $\delta$  и  $2\pi r$  на  $S_0$ , то следующее из него выражение для потока  $G_k$  будет напоминать (7.18), только вместо радиуса  $r$  войдет параметр  $r_g = 2\delta/S_0$ , который играет роль некоторого среднего гидравлического радиуса пор. В выражение для потока будут также входить эмпирические коэффициенты, учитывающие в среднем форму пор и извилистость каналов пористой среды.

Рост давления или увеличение поперечного размера каналов (уменьшение числа Кнудсена) приводит к изменению характера течения газа. В случае с отверстиями наблюдается переход к течению по типу *газодинамической струи*, при расчете скорости которой должна существенно приниматься во внимание сжимаемость газа. В случае течения в капилляре наряду со свободно - молекулярным возникает коллективное *вязкое течение* газа, которое, в предположении несжимаемости жидкости, определяется известной формулой Пуазейля. Для вязкого потока в круглой трубе радиуса  $r$  можно воспользоваться известным из гидродинамики выражением

$$G_P = \frac{r^2}{16\eta RT\ell} S(p^2 - p'^2) = \frac{r^2}{8\eta RT\ell} S\bar{p}\Delta p, \quad (7.21)$$

где  $\eta$  – коэффициент вязкости газа,  $\bar{p}$  – среднее давление газа в канале.

В области течения, переходной от свободно - молекулярного к вязкому, для полного потока приближенно справедлива формула, соответствующая предположению об аддитивности свободно-молекулярного и вязкого потоков

$$Q = Q_k + Q_p = Q_k (1 + a\bar{p}) , \quad .. (7.22)$$

где  $a = 3r / 16\eta \langle v \rangle$ .

Коэффициент вязкости в кинетической теории для модели молекул, взаимодействующих между собой как твердые упругие шары, с хорошей точностью определяется выражением [42]

$$\eta = 0,5mn \langle v \rangle \lambda . \quad (7.23)$$

В этом случае

$$a\bar{p} = 0,148(r/\lambda) , \quad (7.24)$$

т.е. даже при  $r/\lambda \sim 1$  относительная доля вязкого потока составляет не более 15%.

## Диффузия в газовой смеси

Для того чтобы определить пространственное изменение относительной концентрации компонентов газовой смеси в процессах разделения необходимо знать выражения для потоков каждого из компонентов, возникающих в среде в результате неоднородности ее параметров (парциальной плотности компонента, давления, температуры), которые могут меняться от точки к точке. При свободно - молекулярном течении газовой смеси молекулы компонентов смеси взаимодействуют с поверхностью каналов независимо друг от друга, поэтому применение метода баланса импульса для каждого из компонентов приводит к тем же выражениям для потоков компонентов смеси в капилляре, что и в случае простого газа, с учетом различия в молекулярных массах компонентов. Далее мы будем использовать величины потоков  $J_1 = n_1 u_1$  и  $J_2 = n_2 u_2$ , отнесенных к единице площади поперечного сечения капилляра. Тогда, используя выражение (7.19), имеем

$$(J_K)_1 = (D_K)_1 \frac{\Delta n_1}{\Delta x}, \quad (J_K)_2 = (D_K)_2 \frac{\Delta n_2}{\Delta x}, \quad (7.25)$$

где  $\Delta n_1 = n'_1 - n_1$ ,  $\Delta n_2 = n'_2 - n_2$  и вводятся коэффициенты кнудсеновской диффузии

$$(D_K)_1 = \frac{2}{3} r \sqrt{\frac{8RT}{\pi M_1}}, \quad (D_K)_2 = \frac{2}{3} r \sqrt{\frac{8RT}{\pi M_2}}. \quad (7.26)$$

Для пористой среды вместо  $r$  надо использовать гидравлический радиус пор  $r_g = 2\delta/S_0$  и ввести эмпирические поправки, учитывающие форму пор и извилистость каналов.

Выражения (7.25) имеют форму так называемого закона Фика, который связывает диффузионный поток компонента смеси с изменением парциальной плотности этого компонента  $n_k$  вдоль определенного направления (ось  $x$ ). Под явлением, называемом диффузией, подразумевают направленный перенос частиц (или массы) какого-либо вещества в среде другого вещества под действием разности концентраций молекул в разных точках пространства или под действием внешних сил, действующих на молекулы. Закон Фика, описывающий обычную диффузию в газовой смеси в условиях, когда наиболее существенными являются лишь столкновения молекул между собой, а не со стенками сосуда (т.е. при  $\text{Kn} \ll 1$ ), имеет вид

$$(J_D)_1 = D_{12} \frac{\Delta n_1}{\Delta x}. \quad (7.27)$$

Здесь  $(J_D)_1$  – диффузионный поток компонента 1, а  $D_{12}$  называется коэффициентом взаимной (или бинарной) диффузии. В отличие от кнудсеновского коэффициента диффузии, который определяется взаимодействием молекул со стенкой, коэффициент взаимной диффузии связан с взаимодействием молекул различных

сортов друг с другом при их столкновениях. На вычислении этого коэффициента мы остановимся чуть позже.

Отметим теперь одно немаловажное обстоятельство. На самом деле, запись потоков в форме (7.25) и (7.27) через конечную разность парциальных плотностей компонент справедлива лишь при условии постоянства этих потоков. В молекулярной физике принято записывать закон Фика, как и другие подобные законы (например, закон Фурье для потока тепла), используя понятие градиента соответствующей скалярной величины (парциальной плотности, концентрации, температуры и т.д.). Градиентом некоторой скалярной величины называется вектор, характеризующий скорость изменения этой величины в пространстве и направленный в сторону наиболее быстрого ее возрастания. В нашем случае существенно лишь одно направление, соответствующее координате  $x$  (вдоль оси капилляра или перпендикулярно плоскости пористой перегородки). Выражения для  $(J_K)_1$  и  $(J_D)_1$  можно тогда представить как

$$(J_K)_1 = -(D_K)_1 \frac{dn_1}{dx}, \dots, (J_D)_1 = -D_{12} \frac{dn_1}{dx} \quad (7.28)$$

Символическое обозначение  $dn_1/dx$  имеет смысл известной в математике величины – производной некоторой функции (в данном случае производной от парциальной плотности компонента), знак минус означает, что диффузионный поток компонента направлен в сторону падения парциальной плотности.

Укажем также, что если в среде существует отличный от нуля общий поток смеси  $J = J_1 + J_2$ , то диффузионный поток  $(J_D)_1$  определяется в этом случае как разность полного потока легкого компонента  $J_1$  и конвективного потока этого компонента, переносимого вместе с общим потоком, т.е.

$$(J_D)_1 = J_1 - Jc, \quad (7.29)$$

где  $c = n_1/n$  – относительная концентрация (мольная доля) компонента 1 в смеси, при этом  $n = n_1 + n_2$ .

Если принять во внимание, что  $J_1 = n_1 u_1$  и  $J = (n_1 u_1 + n_2 u_2)$ , то выражение для  $(J_D)_1$  принимает вид

$$(J_D)_1 = nc (1 - c)(u_1 - u_2), \quad (7.30)$$

т.е. диффузионный поток оказывается пропорциональным разности макроскопических скоростей компонентов смеси.

Рассмотрим теперь вопрос о получении выражения для диффузионного потока, справедливого в гидродинамической области течения, т.е. при  $Kn \ll 1$ , что позволит нам получить явное выражение для коэффициента бинарной диффузии  $D_{12}$ . Для этого воспользуемся опять *методом баланса импульса*. Выделим в газе малый цилиндрический объем толщиной  $dx$  с поперечным сечением  $S$

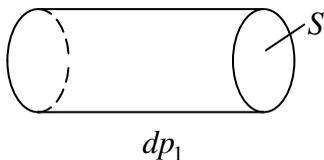


Рис.7.5. К записи уравнения баланса импульса

Если предположить, что плотность или парциальное давление компонента 1 в смеси меняются вдоль направления  $x$ , то сила, действующая на выделенный элемент за счет градиента парциального давления, равна

$$[ p_1 - (p_1 + dp_1) ]S = -Sdp_1 = \left( -\frac{dp_1}{dx} \right) Sdx .$$

При установившейся взаимной диффузии в смеси на молекулы компонента 1 при его направленном движении со скоростью  $u_1$  действует некоторая сила со стороны молекул другого компонента как результат обмена импульсом при столкновениях молекул.. Эта сила  $R_{12}$ , которую называют “силой диффузионного трения”, как

раз и обеспечивает относительное движение компонентов смеси. Она равна (с обратным знаком) среднему изменению импульса всех молекул компонента 1 в результате столкновений с молекулами компонента 2. Уравнение баланса импульса в объеме  $Sdx$  принимает тогда вид

$$\left(-\frac{dp_1}{dx}\right)Sdx = R_{12}Sdx \quad (7.31)$$

Теперь нам придется решить немного более сложную задачу, а именно: рассчитать векторную величину  $\mathbf{R}_{12}$  для случая, когда молекулы компонентов движутся в среде с произвольными направленными скоростями  $\mathbf{u}_1$  и  $\mathbf{u}_2$ . Пусть  $\bar{V}_{12}$  - частота столкновений или число столкновений, испытываемых молекулой компонента 1 в одну секунду с молекулами компонента 2,  $\Delta\mathbf{p}_1$  - изменение ее импульса при одном столкновении. Среднее изменение импульса получается усреднением по всем столкновениям и может быть представлено как  $\bar{V}_{12}\langle\Delta\mathbf{p}_1\rangle$  (для простоты предполагается, что среднее от произведения двух величин можно заменить произведением средних). Выражение для  $\bar{V}_{12}$  в случае модели молекул - твердых шариков может быть легко получено тем же способом, который используется при выводе выражения для средней длины свободного пробега молекул. В результате имеем [42]

$$\bar{V}_{12} = n_2\sigma_{12}\left(\langle v_1\rangle^2 + \langle v_2\rangle^2\right)^{1/2} \quad (7.32)$$

Здесь

$$\langle v_1\rangle^2 + \langle v_2\rangle^2 = \frac{8kT}{\pi\mu_{12}}, \quad \sigma = \pi d_{12}^2, \quad d_{12} = \frac{1}{2}(d_1 + d_2),$$

$$\mu_{12} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2},$$

где  $m_i$  и  $d_i$  - массы и диаметры молекул ( $i = 1, 2$ ).

При усреднении величины  $\langle \Delta p_1 \rangle$  выпадает та ее часть, которая связана с тепловым движением молекул. Поэтому  $\langle \Delta p_1 \rangle = m_1 \langle \Delta u_1 \rangle$ . Если средние направленные скорости молекул компонентов равны  $\mathbf{u}_1$  и  $\mathbf{u}_2$ , то скорость их центра масс определяется как

$$\mathbf{u}_c = \frac{m_1 \mathbf{u}_1 + m_2 \mathbf{u}_2}{m_1 + m_2}$$

Используем теперь то обстоятельство, что при сферически симметричном рассеянии молекул в системе координат, движущейся со скоростью  $\mathbf{u}_c$ , скорости молекул каждого компонента после столкновения равны нулю [42]

Следовательно, в обычной системе отсчета, относительно которой заданы  $\mathbf{u}_1$  и  $\mathbf{u}_2$ , скорости после столкновения равны скорости центра масс  $\mathbf{u}_c$ . Для величины  $\langle \Delta p_1 \rangle = m_1 \langle \mathbf{u}_c - \mathbf{u}_1 \rangle$  в этом случае получаем

$$\langle \Delta p_1 \rangle = \mu_{12} (\mathbf{u}_2 - \mathbf{u}_1)$$

В результате выражение для диффузионной силы трения приобретает вид

$$\mathbf{R}_{12} = -n_1 \bar{v}_{12} \langle \Delta p_1 \rangle = n_1 \bar{v}_{12} \mu_{12} (\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_2) \quad (7.33)$$

Подставляя (7.33) в уравнение баланса импульса (7.31), записываемого для одномерного течения вдоль оси  $x$ , находим

$$n_1 \bar{v}_{12} \mu_{12} (u_1 - u_2) = -\frac{dp_1}{dx}. \quad (7.34)$$

Если выразить отсюда разность направленных скоростей компонентов смеси, то используя определение для  $(J_D)_1$  (7.30) и учитывая, что  $p_1 = n_1 kT$ , приходим при  $T = \text{const}$  к результату

$$(J_D)_1 = -D_{12} \frac{dn_1}{dx} = -\frac{n_2 kT}{n\bar{v}_{12}\mu_{12}} \frac{dn_1}{dx} . \quad (7.35)$$

С учетом определения  $\bar{v}_{12}$  (7.32) из (7.35) следует, что выражение для коэффициента взаимной диффузии в смеси  $D_{12}$  имеет вид

$$D_{12} = \frac{n_2 kT}{n\bar{v}_{12}\mu_{12}} = \frac{1}{2} \left( \frac{\pi kT}{2\mu_{12}} \right)^{1/2} \frac{1}{n\pi d_{12}^2} . \quad (7.36)$$

Для изотопной смеси ( $m_1 \approx m_2 = m, d_1 \approx d_2 = d$ ) полученное выражение соответствует коэффициенту самодиффузии

$$D_{11} = \frac{1}{2} \left( \frac{\pi kT}{m} \right)^{1/2} \frac{1}{n\pi d^2} . \quad (7.37)$$

Любопытно, что результаты, получаемые при использовании строгой кинетической теории [42], отличаются от (7.36), (7.37) лишь численным коэффициентом, равным 3/4. Если учесть этот коэффициент и использовать выражение для вязкости простого газа (7.23) то оказывается, что коэффициент самодиффузии и коэффициент вязкости связаны простым соотношением

$$\frac{mD_{11}}{\eta} = \frac{6}{5} . \quad (7.38)$$

Это соотношение строго справедливо для модели молекул - твердых упругих шаров. Для более реалистических моделей взаимодействия молекул имеем

$$\frac{mD_{11}}{\eta} = \frac{6}{5} A^* , \quad (7.38')$$

где коэффициент  $A^*$  слабо зависит от температуры и его среднее значение можно положить равным 1,10 [42].

Заметим, что используя полученное выражения для  $D_{12}$  (7.36), можно представить уравнение баланса импульса (7.34) также в виде

$$\frac{n_1 n_2 kT}{n D_{12}} (u_1 - u_2) = -\frac{dp_1}{dx} . \quad (7.39)$$

Это выражение легко обобщается на случай, когда в газовой смеси присутствует несколько компонентов ( $N > 2$ ). Для этого при выводе выражения для диффузионной силы трения следует учесть среднюю передачу импульса при столкновениях частицы  $i$ -го компонента смеси с частицами всех остальных компонентов. В общем случае в уравнении баланса импульса помимо силы, связанной с градиентом давления, можно ввести также другие силы, действующие на частицы смеси. В результате общее уравнение баланса импульса для частиц  $i$ -го сорта в многокомпонентной газовой смеси принимает вид

$$\sum_{k \neq i}^N \frac{n_i n_k kT}{n D_{ik}} (u_i - u_k) = -\frac{dp_i}{dx} + n_i f_i . \quad (7.40)$$

Суммирование в левой части этого уравнения производится по всем компонентам смеси, кроме выделенного  $i$ -го компонента. При этом  $f_i$  — это сила, действующая на частицы  $i$ -го сорта, так что  $n_i f_i$  соответствует суммарной силе, действующей на эти частицы в единице объема среды. Под силами  $f_i$  могут подразумеваться силы тяжести, центробежные силы инерции, силы вязкого трения, электромагнитные силы (действующие на заряженные частицы в ионизованном газе) и т.п. Уравнение (7.40) будет использоваться в дальнейшем при анализе физических явлений, лежащих в основе некоторых молекулярно-кинетических методов разделения изотопов.

*В этом процессе, как на выходе из кинотеатра после окончания сеанса: маленькие юркие дети быстрее проскакивают к выходу, чем солидные и степенные взрослые .*

И.В.Курчатов

## **Глава 8. ГАЗОДИФФУЗИОННЫЙ МЕТОД РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ**

Рассказывают, что шутливое замечание, взятое эпиграфом к этой главе, прозвучало на одном из научных совещаний у руководителя Советского атомного проекта И.В.Курчатова, где И.К. Кикоин делал сообщение о газодиффузионном методе разделения изотопов урана. На самом деле это образное сравнение мы вправе отнести к любым другим методам, в основе которых лежит разделение молекул разных сортов за счет различий в скоростях движения компонентов газовой смеси. Такое разделение может происходить, если в газе поддерживается неоднородность в пространстве каких-либо параметров (например, давления или температуры), либо под влиянием внешних сил, действующих на молекулы. Эффект разделения при этом существенно зависит от различия в массах молекул, принадлежащих разным сортам, а процесс перемешивания молекул (выравнивание концентраций компонентов смеси за счет диффузии) стремится уменьшить разделительное действие.

В предыдущей главе мы рассмотрели ряд явлений, описываемых кинетической теорией газов, которые, как мы сейчас покажем, имеют прямое отношение к газодиффузионному методу разделения изотопов. Возможность использования одного из этих явлений (*закон квадратного корня*) для разделения газовых смесей была понята достаточно давно. Еще в 1896 году Дж. Релей писал: *“... смесь двух газов различных атомных весов может быть частично разделена, если заставить смесь продиффундировать через пористую перегородку”*. Тогда же этот метод был фактически использован У. Рамзаем, когда он открыл гелий земного происхождения, многократно пропуская через глиняную трубку газ, добытый из уранового минерала — клевета. В нашем

историческом обзоре упоминалось также о попытках Ф. Астона разделить изотопы неона с помощью диффузии через пористую трубку.

Значительный успех в использовании газодиффузионного метода был достигнут в 1932 году, когда немецкий ученый Г. Герц соединил несколько диффузионных разделительных устройств в так называемый каскад, состоящий из 12 ступеней, каждая из которых была снабжена двумя ртутными насосами, обеспечивающими циркуляцию газа в каскаде. На этой установке ему удалось получить неон, содержащий 75% изотопа  $^{22}\text{Ne}$ , в то время как исходная концентрации этого изотопа в природной смеси составляла только 10%. Позднее, в 1933 году на установке, содержащей 50 ступеней, был получен практически чистый  $^{22}\text{Ne}$ . На ней же осуществлялось разделение смеси водорода с дейтерием. На каскаде из 34 ступеней, заполненных метаном, Герцем было получено обогащение до 16% по изотопу  $^{13}\text{C}$ . В своих устройствах в качестве материала фильтров ученый использовал довольно грубодисперсные пористые среды, что вызывало необходимость работы при относительно низких давлениях газа. По этой причине количества разделяемого продукта оказывались очень малыми. Тем не менее, установки Герца явились прообразом будущих диффузионных каскадов и диффузионных заводов, построенных для разделения изотопов урана.

Полученные выше оценки для средней длины свободного пробега молекул (см. табл. 7.1 и формулу (7.13)) позволяют сделать важные выводы, относящиеся к практическому осуществлению газодиффузионного метода разделения изотопов. Диффузионные машины первых поколений, использовавшиеся для разделения изотопов урана на Уральском электрохимическом комбинате, имели рабочее давление на входе в пористые фильтры на уровне 20 тор (0,026 атм) [8], что соответствует длине свободного пробега молекул в порах  $\lambda \sim 0,8$  мкм. Это означает, что для создания режима течения в порах, близкого к свободно-молекулярному, необходимо было использовать пористые перегородки со средним радиусом пор порядка одной десятой

микрона ( $10^{-7}$  м). Более производительные диффузионные машины последних поколений работали уже при давлении, в десять раз большем ( $\sim 200$  тор или 0,26 атм) [8]. Это стало возможным благодаря успехам в создании пористых фильтров с делящим слоем, средний размер пор которого составлял порядка одной сотой микрона ( $10^{-8}$  м или 10 нанометров).

Напомним, что эффективный диаметр самих молекул составляет  $\sim 6 \cdot 10^{-10}$  м, т.е. всего лишь в 16 раз меньше, чем размеры каналов в пористой среде. Приведенные оценки показывают, какая сложная проблема по созданию пористых перегородок с необыкновенно малыми размерами пор стояла перед разработчиками фильтров для разделения изотопов урана. Пористые фильтры, на одном квадратном сантиметре которых умещается порядка миллиона отверстий пор, представляют собой уникальное достижение науки и технологии.

## Проницаемость пористого фильтра

Для определения потока газа через фильтры в реальных условиях удобно пользоваться понятием проницаемости фильтра  $\gamma$ , так что полный поток через пористую перегородку равен

$$Q = \frac{1}{\sqrt{2\pi RTM}} \gamma F \Delta p, \quad (8.1)$$

где  $F$  – полная площадь поверхности перегородки. В режиме свободно - молекулярного течения и для модели пористого фильтра в виде набора  $K$  длинных круглых капилляров выражение для  $\gamma_o$  получается из сравнения формул (8.1) и полученной в главе 7 формулы (7.20)

$$\gamma_o = 8\pi r^3 K / 3F\ell.$$

Для однородной и изотропной модели пористой среды проницаемость  $\gamma_o$  можно представить как

$$\gamma_o = 16\delta^2 \beta_k / 3S_o q \ell.$$

Здесь использовано то обстоятельство, что отношение площади видимых отверстий пор к полной площади фильтра для принятой модели среды равно значению пористости  $\delta$ , кроме того, введены определения среднего гидравлического радиуса пор  $r_g = 2\delta/S_0$ , эмпирического коэффициента формы поперечного сечения пор  $\beta_k$  и коэффициента извилистости пор  $q$ . Как видно, величина проницаемости  $\gamma_0$  определяется лишь структурными характеристиками пористой среды и толщиной перегородки.

На практике полная проницаемость фильтра  $\gamma$  определяется экспериментально по расходу газа через фильтр при заданном перепаде давления на нем. При этом в соответствии с аддитивностью свободно-молекулярного и вязкого потоков в пористой среде (см. формулу (7.22)) реальная проницаемость фильтра линейно зависит от среднего давления

$$\gamma = \gamma_0 (1 + a\bar{p}). \quad (8.2)$$

Наклон этой линейной зависимости (коэффициент  $a$ ) позволяет судить о характерном размере пор среды, поскольку величина  $a$  пропорциональна среднему гидравлическому радиусу пор  $r_g = 2\delta/S_0$ .

## Эффект разделения

Выражения для потока (8.1) и проницаемости среды (8.2) являются важными характеристиками для определения суммарной площади пористых перегородок в реальных диффузионных машинах, обеспечивающей необходимый расход газа в них. В случае изотопных смесей с малым различием масс молекул этот расход может определяться с хорошей точностью приведенными выше формулами со средним значением молекулярной массы смеси ( $M = \bar{M}$ ). Наоборот, для определения таких важных параметров, как коэффициент разделения и коэффициент обогащения изотопной смеси, важным является учет малой разности масс молекул изотопов, которые приводят к различию в

направленных скоростях движения компонентов изотопной смеси в каналах пористого фильтра.

Рассмотрим сначала некоторую идеализированную схему устройства, в котором осуществляется разделение газовой смеси, т.е. изменение относительного содержания (концентрации) компонентов в ней. Представим себе широкую трубу, которая разделена на два объема  $V$  и  $V'$  пористой перегородкой. Благодаря непрерывной работе компрессора, подающего газую смесь в объем  $V$ , или насоса, откачивающего смесь из объема  $V'$ , устанавливается неизменный во времени (стационарный) поток газовой смеси в трубе и возникает некоторый перепад давлений  $\Delta p = p_0 - p'$  на пористой перегородке (рис. 8.1). Пусть смесь состоит из двух компонентов, причем индекс 1 относится к легкому и индекс 2 – к тяжелому компоненту смеси. Введем понятие относительной концентрации первого компонента смеси  $c$ , так что парциальное давление этого компонента  $p_1 = pc$ . Для второго компонента  $p_2 = p(1 - c)$ , где  $p$  – полное давление смеси.

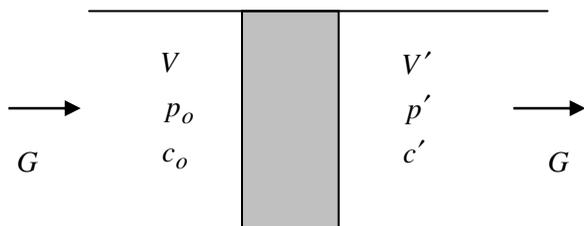


Рис. 8.1. Течение газовой смеси в трубе

В кнудсеновском режиме течения независимые потоки каждого из компонентов смеси через пористую перегородку определяются выражениями

$$G_1 = \frac{A}{\sqrt{M_1}} (p_0 c_0 - p' c'), \quad G_2 = \frac{A}{\sqrt{M_2}} [p_0 (1 - c_0) - p' (1 - c')], \quad (8.3)$$

где  $A = \gamma_0 F / \sqrt{2\pi RT}$ , а обозначения  $c_0$  и  $c'$  соответствуют концентрации легкого компонента непосредственно перед входом в фильтр и на выходе из него.

На выходе из пористой перегородки потоки компонентов смеси определяются только их конвективным переносом вместе с общим потоком смеси  $G$ , поэтому

$$G_1 = Gc', \quad G_2 = G(1 - c') . \quad (8.4)$$

Теперь можно воспользоваться определением *коэффициента разделения* смеси по обогащенной фракции, которое было введено в главе 6:

$$\alpha' = \frac{c'}{1 - c'} / \frac{c_0}{1 - c_0} . \quad (8.5)$$

Напомним, что величина  $\alpha' = \alpha' - 1$  носит при этом название *коэффициента обогащения*. Мы используем здесь значения концентраций  $c_0$  вместо  $c_{ex}$ , полагая, что  $c_0$  соответствует концентрации легкого компонента непосредственно перед входом в пористый фильтр.

Для малых значений коэффициента обогащения ( $\epsilon \ll 1$ ), характерных для тяжелых изотопных смесей, в соответствии с формулой (6.11) имеем

$$(\Delta c)_\phi = c' - c_0 = \epsilon_0 c_0 (1 - c_0) . \quad (8.6)$$

Заметим, что из формулы (8.4) следует

$$\frac{c'}{1 - c'} = \frac{G_2}{G_1} . \quad (8.7)$$

Для определения коэффициента обогащения в случае свободно-молекулярного течения через пористый фильтр можно теперь воспользоваться выражениями для потоков компонентов смеси в форме (8.3). При этом самые простые результаты для  $\alpha_0$  и  $\epsilon_0$

получаются из соотношений (8.5), (8.3) и (8.7) для случая, когда  $p' \ll p_0$ , а именно

$$\alpha_0 = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}}, \quad \varepsilon_0 = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} - 1. \quad (8.8)$$

Для изотопных смесей тяжелых элементов коэффициент обогащения  $\varepsilon_0$  оказывается заметно меньшим единицы и приближенно записывается в виде

$$\varepsilon_0 \approx \Delta M / 2\bar{M}, \quad (8.8')$$

где  $\Delta M = M_2 - M_1$  и  $\bar{M} = (M_1 + M_2)/2$  – средняя молекулярная масса<sup>1)</sup>.

Выражения (8.8) и (8.8') определяют максимально возможные теоретические коэффициенты обогащения при однократном пропускании смеси через пористый фильтр. На самом деле, по ряду причин, о которых мы скажем позже, реальные коэффициенты обогащения на фильтре оказываются меньшими, чем это значение.

В общем случае, когда нужно учитывать величину конечного давления за фильтром, использование уравнений (8.7) и (8.3) при  $\varepsilon_0 \ll 1$  дает следующее выражение для скачка концентраций на фильтре

$$(\Delta c)_\phi = \varepsilon_0 c_0 (1 - c_0)(1 - k), \quad (8.9)$$

где  $k = p'/p_0$ .

Естественно, что при отсутствии перепада давлений на фильтре ( $k = 1$ ) отсутствует и эффект разделения смеси.

## Диффузия в переходной области давлений

Теперь мы попытаемся объяснить, почему с возрастанием давления или увеличением характерного размера пор, (т.е. при переходе в область промежуточных значений числа Кнудсена) происходит заметное уменьшение эффекта разделения по сравнению с его максимальным значением при  $\text{Kn} \gg 1$ . Для этого

нам надо понять, как изменяются значения потоков компонентов смеси в капилляре и пористой среде для режима течения, переходного от свободно - молекулярного к вязкому.

Рассмотрим вопрос о выводе уравнений, из которых можно для переходного режима течения найти выражения для потоков  $J_1 = n_1 u_1$ ,  $J_2 = n_2 u_2$  и  $(J_D)_1$  (Как и в главе 7, мы рассматриваем здесь потоки, отнесенные к единице площади сечения среды). Для того чтобы учесть одновременно и кнудсеновскую и обычную диффузию газовой смеси в капилляре, воспользуемся опять *методом баланса импульса*. Обратимся сначала к полученному в предыдущей главе выражению для кнудсеновского потока (7.28). В свободно-молекулярном режиме течения потоки каждого из компонентов смеси являются независимыми. В частности, для потока  $J_{1K}$  мы имеем

$$J_{1K} = -(D_K)_1 \frac{dn_1}{dx},$$

где  $D_{1K} = (1/3)d\langle v_1 \rangle$  – кнудсеновский коэффициент диффузии для компонента 1 при течении смеси в капилляре. Такое представление выражения для потока фактически вытекает из уравнения баланса импульса для компонента 1 при учете столкновения его молекул со стенкой капилляра. Соответствующее уравнение с учетом соотношения  $p_1 = n_1 kT$  может быть теперь записано как

$$-\left(\frac{dp_1}{dx}\right)_K = \frac{kT}{(D_K)_1} n_1 u_1. \quad (8.10)$$

Левая часть (8.10) представляет собой силу, действующую на компоненту 1 в единице объема газа, которая обусловлена разностью парциальных давлений этого компонента на бесконечно малой длине  $dx$ . Правая часть соответствует средней передаче импульса молекул компонента 1 при их столкновениях со стенкой.

Выражение для силы диффузионного трения, связанной со средней передачей импульса при столкновениях частиц, было получено в предыдущей главе. В случае бинарной смеси имеем

$$-\left(\frac{dp_1}{dx}\right)_D = \frac{n_1 n_2 kT}{nD_{12}}(u_1 - u_2). \quad (8.11)$$

Полное уравнение баланса импульса для первого компонента смеси принимает тогда вид

$$-\frac{dp_1}{dx} = \frac{kT}{(D_K)_1} n_1 u_1 + \frac{n_1 n_2 kT}{nD_{12}}(u_1 - u_2). \quad (8.12)$$

Аналогичное уравнение записывается и для второго компонента смеси

$$-\frac{dp_2}{dx} = \frac{kT}{(D_K)_2} n_2 u_2 - \frac{n_1 n_2 kT}{nD_{12}}(u_1 - u_2). \quad (8.13)$$

Уравнения баланса импульса в форме (8.12), (8.13) могут быть записаны и для диффузии газовой смеси в пористой среде. В этом случае кнудсеновские коэффициенты диффузии определяются с использованием гидравлического радиуса пор, а вместо обычного коэффициента бинарной диффузии  $D_{12}$  применяется величина  $D_{12}(\delta/q)$ , где  $\delta$  – пористость среды,  $q$  – коэффициент извилистости каналов.

Любопытно отметить, что уравнения диффузии смеси в пористой среде можно получить независимым образом на основе модели так называемого *стеночного газа*. В этой модели, которую предложил в пятидесятых годах советский физик Юрий Каган (ныне академик РАН), пористая среда представляется ансамблем частиц, неподвижно закрепленных в пространстве. При этом уравнения, описывающие перенос компонентов смеси в переходной области от кнудсеновской к обычной диффузии, можно получить из обычных уравнений диффузии для

многокомпонентной смеси в предположении, что частицы пористой среды образуют один из ее компонентов и имеют бесконечно большие массу и сечения столкновений. Аналогичная модель, названная моделью *запыленного газа*, была разработана американскими учеными лишь спустя шесть лет [43]. На основе модели стеночного газа Ю. Каганом была создана теория разделения многокомпонентных газовых смесей в пористых средах в переходной области течения [19].

Легко усмотреть простую аналогию в записи уравнений баланса импульса (8.12), (8.13) с записью закона Ома для эквивалентной электрической цепи, в которой роль напряжений играют градиенты парциальных плотностей, а роль сил токов – потоки компонентов. Схема такой цепи, объединяющей различные механизмы переноса, представлена на рис. 8.2. При этом следует иметь в виду, что после вычисления на основании (8.12), (8.13) потоков  $n_1 u_1$  и  $n_2 u_2$ , имеющих диффузионную природу, к ним следует добавить составляющую, отвечающую переносу компонента смеси вязким потоком, так что полные потоки компонентов определяются выражениями

$$J_1 = n_1(u_1 + u_B), \quad J_2 = n_2(u_2 + u_B), \quad (8.14)$$

где

$$u_B = -(K/\eta) dp/dx. \quad (8.15)$$

Здесь  $K$  – константа Дарси (для капилляра  $K = r^2/8$ ).

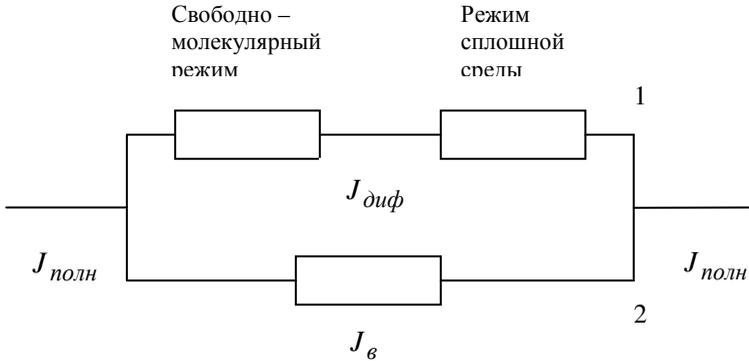


Рис.8.2. Эквивалентная электрическая цепь как мнемоническая схема объединения различных механизмов переноса. 1 – ветвь диффузионного течения, 2 – ветвь вязкого течения

Решая совместно уравнения (8.12) и (8.13), можно получить не только выражения для самих потоков, но также и выражение для диффузионного потока  $(J_D)_1 = nc (1 - c)(u_1 - u_2)$ . Последний результат представляет для нас особый интерес, так как именно с наличием разности скоростей компонентов связан эффект разделения. Получаемое выражение для диффузионного потока можно представить в виде

$$(J_D)_1 = -nD \left[ \frac{dc}{dx} + \alpha_p c(1 - c) \frac{1}{p} \frac{dp}{dx} \right]. \quad (8.16)$$

Здесь  $D$  – обобщенный коэффициент диффузии, определяемый соотношением

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{(D_k)_{12}} + \frac{1}{D_{12}}, \quad (8.17)$$

где  $(D_k)_{12} = (D_k)_1(1 - c) + (D_k)_2c$ .

Выражение (8.17) выглядит естественным, если иметь в виду аналогию с эквивалентной электрической цепью (рис.8.2), в которой величины, обратные соответствующим коэффициентам диффузии, выступают в роли электрических сопротивлений.

Коэффициент  $\alpha_p$  называется постоянной бародиффузии в кнудсеновском потоке и имеет вид

$$\alpha_p = \frac{\sqrt{M_2} - \sqrt{M_1}}{\sqrt{M_1} c + \sqrt{M_2} (1 - c)} . \quad (8.18)$$

Именно наличием бародиффузии в смеси внутри капилляра и определяется эффект разделения. Для изотопных смесей тяжелых элементов выражение для диффузионного потока можно представить в виде

$$(J_D)_1 = -n \frac{D_K}{1 + bp} \left[ \frac{dc}{dx} + \frac{\Delta M}{2M} c (1 - c) \frac{1}{p} \frac{dp}{dx} \right] , \quad (8.19)$$

где  $bp = (D_K / D_{11})$ . Для оценки величины  $bp$  воспользуемся формулами (7.26) и (7.37) и определением средней длины свободного пробега молекул (7.13). Тогда в случае капилляра имеем

$$bp \approx 1.11 (r / \lambda) . \quad (8.20)$$

Из этого выражения следует, что при  $r / \lambda \sim 1$  величина диффузионного потока через капилляр уменьшается примерно в два раза. Напомним, что доля вязкого потока составляет при этом не более 15%.

Заметим теперь, что в соответствии с определениями (7.29) и (8.4) диффузионный поток можно представить в виде

$$(J_D)_1 = J_1 - Jc = J(c' - c) . \quad (8.21)$$

Полный поток  $J$ , отнесенный к единице площади сечения капилляра, в случае изотопной смеси определяется как

$$J = -\frac{1}{kT} D_K (1 + ap) \frac{dp}{dx} . \quad (8.22)$$

В результате, используя (8.19) и (8.22), приходим к уравнению, которое называется *уравнением разделения изотопной смеси в капилляре или пористой среде*

$$(c' - c) = \frac{1}{(1 + ap)(1 + bp)} \left( p \frac{dc}{dp} + \frac{\Delta M}{2M} c (1 - c) \right) . \quad (8.23)$$

Это уравнение относится к разряду так называемых дифференциальных уравнений первого порядка, решение которых при граничных условиях, соответствующих в нашем случае входу и выходу из канала, рассматривается в курсах высшей математики. Мы не будем заниматься его решением. Упомянем лишь, что в кнудсеновском режиме течения ( $ap \rightarrow 0, bp \rightarrow 0$ ) его решение приводит к результату, в точности совпадающему с формулой (8.9). Качественный результат в общем случае можно получить, если в первом приближении пренебречь в (8.23) членом  $dc/dp$ , который соответствует обратной диффузии в канале, и заменить  $c$  на  $c_0$ .

В результате получаем

$$(\Delta c)_\phi = \frac{\Delta M}{2M} c_0 (1 - c_0) \frac{1}{(1 + ap)(1 + bp)} . \quad (8.24)$$

Из этого выражения следует, что эффект разделения уменьшается главным образом за счет роста величин  $ap$  и  $bp \sim (r/\lambda)$ . К их возрастанию приводит либо повышение давления либо увеличение радиуса канала. При этом увеличение доли вязкого потока сказывается на эффекте разделения менее существенно, чем уменьшение эффективного коэффициента диффузии, поскольку  $a/b = 0,135$ . Учет обратной диффузии приводит к еще более сильному падению эффекта. Зависимость

скачка концентрации на фильтре можно представить поэтому как функцию от одного из этих параметров, например от  $bp \sim r/\lambda$  и отношения давлений  $k = p'/p$ . Реальная зависимость от этих параметров конечно несколько отличается от (8.24), поскольку надо учитывать еще член  $pd c/dp$  в уравнении разделения, который является отрицательным (давление падает, а концентрация растет) и, следовательно, дополнительно уменьшает эффект. Удобно описывать эту зависимость с помощью фактора  $Z$ , так что

$$(\Delta c)_\phi = \varepsilon_\phi c_0 (1 - c_0),$$

где

$$\varepsilon_\phi = \frac{\Delta M}{2M} Z(bp, k)(1 - k). \quad (8.25)$$

В кнудсеновском режиме течения смеси через фильтр имеем  $Z = 1$ .

Вернемся теперь к схеме, изображенной на рис.8.1. Следует сразу подчеркнуть, что хотя сам эффект разделения на фильтре в рассматриваемом нами случае и имеет место, предложенная схема течения газовой смеси через фильтр не может служить прообразом разделяющего устройства (делителя). На самом деле здесь происходит следующее. Поскольку средняя направленная скорость компонентов в пористом фильтре оказывается различной, преимущественный уход одного из компонентов через фильтр приводит к обеднению смеси легким компонентом непосредственно перед его входом. В результате возникает плавное падение концентрации легкого компонента от его исходного значения  $c_{ex}$  на входе в трубу до значения  $c_0$  на входе в фильтр. Это выглядит вполне естественным, поскольку убыль легкого компонента перед фильтром должна пополняться притоком его из области, где поток еще только входит в трубу. Механизмом, поставляющим недостающее количество легкого компонента, является в этом случае обычная диффузия в смеси или перенос компонента в сторону падения его концентрации. Реальное

распределение концентрации  $c$  по длине трубы представлено на рис. 8.3. Как видно, скачок концентрации на фильтре (эффект разделения) полностью компенсируется падением концентрации в объеме перед фильтром. Этого и следовало ожидать, поскольку из условия постоянства потока каждого компонента смеси следует  $G_1 = Gc_{вх} = Gc'$  или  $c' = c_{вх}$ , т.е. различие между концентрацией на входе в трубу и на выходе из нее равно нулю.

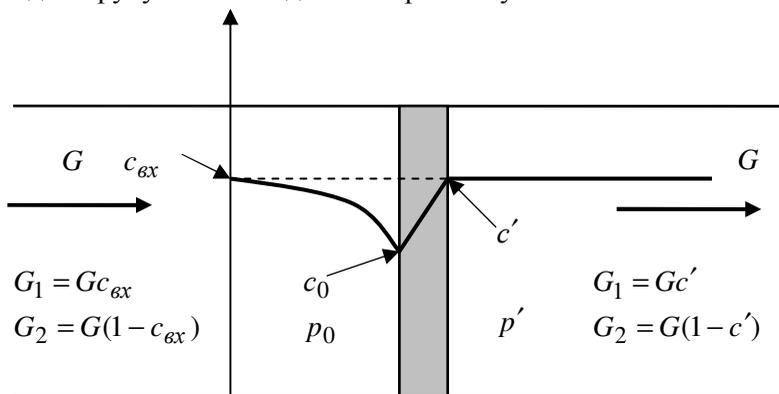


Рис.8.3. Реальное распределение концентрации по длине трубы

## Делитель

Для того чтобы осуществить реальное обогащение смеси легким компонентом, необходимо создать условия, при которых поступающий в делитель поток смеси разделяется на две части, одна из которых содержит обогащенную фракцию, а другая обеднена легким компонентом. На практике делитель представляет собой цилиндрический бак, внутри которого размещены фильтры в виде пучка трубок с пористыми стенками. Принципиальная схема делительного устройства диффузионном методе разделения уже рассматривалась нами в главе 6 (см. рис. 6.1).

Во внутреннее пространство трубок поступает поток питания  $Q$  при давлении  $p$  и концентрации легкой фракции  $c_{вх}$ . Этот поток движется вдоль каналов и по мере продвижения часть его

проникает через пористые стенки, на внешней стороне которых поддерживается более низкое давление  $p'$ . Поток обогащенной фракции  $Q'$  (отбор) с концентрацией  $c'$  отводится через общий выход более низкого давления  $p' < p$ . Поток газа, не прошедший через фильтры, при течении вдоль каналов постепенно обедняется легким компонентом до концентрации  $c''$ , уменьшаясь от величины  $Q$  на входе до величины  $Q''$  на выходе при давлении  $p''$ , образуя поток тяжелой фракции (отвал). Потоки и концентрации легкого компонента в различных фракциях удовлетворяют уравнениям сохранения (6.2).

В главе 6 было отмечено, что полное обогащение на газодиффузионной ступени определяется суммой перепадов концентрации, возникающих на трассах обогащенной и обедненной фракций. Соответствующий полный коэффициент обогащения ступени  $\epsilon$  должен определяться с учетом непрерывного падения величины потока и концентрации легкого компонента по мере течения потока питания в трубках по трассе обедненной фракции. Если принять, что скачок концентрации на фильтре  $(\Delta c)_\phi = c' - c$  остается постоянной величиной в любом сечении трубок по ходу потока, то концентрация  $c'$  за фильтрами меняется по длине трубок потому же закону, что и перед фильтрами. Рассмотрим, как в этом случае определяется полный эффект обогащения на делителе

Пусть величина потока по трассе обедненной фракции уменьшается на длине  $dx$  на величину  $dQ$ , так что такая же величина  $dQ$  проходит через фильтры в поток низкого давления (рис.8.3). Если обозначить концентрацию легкого компонента в сечении  $x$  через  $c$  и изменение концентрации на длине  $dx$  через  $dc$ , то уравнение баланса легкого компонента в рассматриваемом сечении делителя имеет вид

$$Qc = c'dQ + (Q - dQ)(c - dc) .$$

В пренебрежении малым квадратичным членом  $dQdc$  приходим

к уравнению

$$dc = (\Delta c)_\phi \frac{dQ}{Q}, \quad (8.26)$$

которое представляет собой простейшее дифференциальное уравнение первого порядка с разделяющимися переменными.

Мы полагаем, что читатель знаком с элементарным интегрированием функций. Интегрирование (8.26) слева и справа (по концентрации от величины  $c_0$  до  $c''$  и по потоку от  $Q_0$  до  $Q''$ ) дает<sup>1</sup>

$$\Delta c'' = (\Delta c)_\phi \ln(1 - \theta),$$

где  $\theta = Q'/Q_0$  – коэффициент деления потоков. Для величины обогащения по легкой фракции имеем

$$\Delta c' = (\Delta c)_\phi \frac{1 - \theta}{\theta} \ln(1 - \theta). \quad (8.27)$$

Отсюда следует, например, что при делении потока пополам ( $\theta = 0,5$ ) коэффициент обогащения по легкой фракции  $\varepsilon'$  определяется выражением

$$\varepsilon' = \varepsilon_\phi \ln 2 = 0,693 \varepsilon_\phi. \quad (8.28)$$

Полный коэффициент обогащения ступени при этих условиях будет в два раза больше.

Существует, однако, еще одна причина, приводящая к уменьшению эффекта разделения в делителе. Суть ее становится ясной из картины распределения концентраций, представленной на рис. 8.3.

---

<sup>1</sup> При интегрировании используется известный табличный интеграл

$$\int_a^b x^{-1} dx = \ln x \Big|_a^b = \ln \frac{b}{a}, \text{ где } \ln x \text{ – натуральный логарифм переменной } x$$

Как уже отмечалось, в случае, когда весь поступающий поток питания проходит через фильтр ( $\theta = 1$ ), падение концентрации по направлению к фильтру полностью компенсирует последующее возрастание ее за счет эффекта разделения. Разумеется, и в случае реального делителя с разделением потока питания на две части концентрация легкого компонента непосредственно на входе в фильтр  $c_0$  будет меньше среднего значения концентрации  $\bar{c}$  в сечении делителя. Влияние этого эффекта можно учесть с помощью коэффициента неполного перемешивания

$$\sigma = (c' - \bar{c}) / (c' - c_0) .$$

Полный коэффициент обогащения ступени можно представить в этом случае как

$$\varepsilon = 1.385 \frac{\Delta M}{2M} Z(bp, k)(1 - k)\sigma . \quad (8.29)$$

Следует сказать, что влияние неполного перемешивания оказалось весьма значительным в диффузионных машинах с малым расходом газа, где поток в делителе между плоскими пористыми пластинами носил ламинарный характер и перемешивание обеспечивалось обычной диффузией. Теоретические расчеты фактора  $\sigma$  для ламинарного течения, проведенные С.Л. Соболевым и Я.А. Смородинским, показали, что снижение эффекта в этом случае может достигать до 40%. Ситуацию удалось изменить к лучшему при переходе к делителю с трубчатыми фильтрами и большей величиной потоков (расхода газа). Режим течения газовой смеси в трубках оказывается при этом турбулентным, и величина  $\sigma$  возрастает, приближаясь к единице, особенно если предпринять дополнительные меры по повышению интенсивности турбулентного переноса. Теория турбулентного делителя была развита в 1950 году Ю.М. Каганом.

*Во всех случаях различие свойств изотопов, обусловленное различием масс их ядер, используется для создания элементарного (однократного) разделительного эффекта, затем этот эффект многократно умножается за счет противотока в колоннах .*

А.М.Розен

## **ГЛАВА 9. ТЕРМОДИФФУЗИОННАЯ И МАСС-ДИФФУЗИОННАЯ КОЛОННЫ**

### **Термическая диффузия в газовой смеси**

В истории научных открытий нередко встречаются случаи, когда какое-либо явление сначала предсказывается теоретически и лишь затем подтверждается экспериментально. О таких явлениях принято говорить, что они “были открыты на кончике пера”. Классическим и часто приводимым примером служит одновременное и независимое открытие английским ученым Адамсом и французским ученым Леверрье планеты Нептун, которые рассчитали ее положение на небесной сфере с помощью уравнений ньютоновской теории всемирного тяготения, используя данные наблюдаемых астрономами возмущений в движении ее соседки по солнечной системе – планеты Уран. Астрономы, направившие свои телескопы в указанное место, тут же обнаружили неизвестную ранее планету. Можно сказать, что открытие явления термической диффузии в газовых смесях, хотя и не носит такого глобального характера, также относится к подобной категории случаев.

Явление термической диффузии (термодиффузии) заключается в том, что при наличии неоднородности (градиента) температуры в газовой или жидкой смеси возникает относительное движение (диффузия) ее компонентов. Как следствие этого, в смеси, заключенной в замкнутый объем и имеющей первоначально постоянный состав, появляется неоднородность состава или градиент концентрации. Поскольку эта неоднородность, в свою очередь, вызывает обычную (концентрационную) диффузию, в

установившемся состоянии между границами объема возникает разность концентраций, при которой разделительное действие термической диффузии уравнивается перемешивающим эффектом обычной диффузии. Таким образом, термическая диффузия вызывает частичное разделение компонентов первоначально однородной смеси.

Об этом явлении стало известно после того, как в 1911 году Д.Энског и через несколько лет независимо от него С.Чепмен построили общую кинетическую теорию явлений переноса (вязкости, теплопроводности и диффузии) в газах. Вообще говоря, уравнения переноса в газах исследовались задолго до этого еще в работах Максвелла. Однако для упрощения расчетов ему понадобилось использовать одно сильное допущение о характере взаимодействия молекул между собой. Он предположил, что молекулы представляют собой точечные центры сил, которые отталкиваются друг от друга с силой, убывающей обратно пропорциональной пятой степени расстояния между ними (подобные молекулы до сих пор называются “максвелловскими”). Позднее выяснилось, что именно для такой модели молекул теоретически рассчитываемый коэффициент термодиффузии  $D_T$  обращается в нуль. Из-за этого открытие самого явления отодвинулось почти на пятьдесят лет.

При предыдущем обсуждении диффузионных явлений, мы уже рассматривали выражение для диффузионного потока  $(J_D)_1$ , которое следует из уравнения баланса импульса (7/35). Если давление в газе постоянно ( $p = \text{const}$ ), то, используя определение  $p_1 = pc$ , можно представить диффузионный поток в виде

$$(J_D)_1 = nc(1-c)(u_1 - u_2) = -nD_{12} \frac{dc}{dx},$$

где  $D_{12}$  – коэффициент взаимной диффузии, определяемый выражением (7.36).

Наличие термодиффузии приводит к появлению еще одного члена в этом выражении, так что

$$(J_D)_1 = -nD_{12} \frac{dc}{dx} - D_T \frac{1}{T} \frac{dT}{dx}$$

или

$$(J_D)_1 = -nD_{12} \left[ \frac{dc}{dx} + \alpha_T c(1-c) \frac{1}{T} \frac{dT}{dx} \right]. \quad (9.1)$$

Величина  $D_T$  называется коэффициентом термодиффузии, а величина  $\alpha_T = D_T / D_{12} c(1-c)$  – постоянной термодиффузии. Из результатов кинетической теории следует, что постоянная  $\alpha_T$  не зависит от давления, а в случае изотопной смеси не зависит также и от относительной концентрации компонентов.

Термодиффузия относится к тем кинетическим явлениям, которым трудно дать элементарное объяснение, хотя попытки такого рода не раз делались. Это связано с тем, что термодиффузия в большей степени, чем другие явления переноса, определяется особенностями взаимодействия молекул при их столкновениях, а постоянная термодиффузии  $\alpha_T$  в зависимости от характера силового взаимодействия молекул может даже менять знак.

Выражение для  $\alpha_T$ , получаемое методами строгой кинетической теории, в общем случае произвольной газовой смеси выглядит довольно сложно. Для наших целей достаточно привести лишь один результат, справедливый в частном случае изотопной смеси с малой относительной разницей масс молекул компонентов и для модели молекул, отталкивающихся с силой, убывающей обратно пропорционально  $v$ -й степени расстояния [44]

$$\alpha_T = \frac{105}{118} \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \frac{v-5}{v-1} C(v) \quad (9.2)$$

Здесь  $C(v)$  – коэффициент, слабо меняющийся от значения 0,807 при  $v=3$  до 1,0 при  $v \rightarrow \infty$ . Заметим, что  $v \rightarrow \infty$  соответствует модели молекул - твердых упругих шаров. Как и следовало

ожидать,  $\alpha_T$  обращается в нуль для максвелловских молекул ( $v = 5$ ). Эксперимент показывает, что для большинства газов сила отталкивания спадает с расстоянием достаточно круто, так что значения  $v$  обычно больше пяти.

Для нас существенно, что постоянная термодиффузии, как и постоянная бародиффузии в задаче о разделении смеси на пористом фильтре, зависит от относительной разницы масс молекул. Как и раньше, мы будем полагать индекс 1 относящимся к легкому компоненту смеси. Это означает, что почти во всех случаях изотопных смесей постоянная термодиффузии  $\alpha_T$  оказывается отрицательной. Таким образом, легкие молекулы должны диффундировать в сторону возрастания температуры, т.е. против направления, в котором происходит обычный перенос тепла. Это, как правило, и наблюдается на опыте.

Первое экспериментальное подтверждение эффекта термодиффузии было получено в специально поставленных в 1917 году опытах Чепмена и Дутсона, которые измеряли его в смеси  $H_2 - CO_2$ , заполнявшей два резервуара, соединенных трубкой. После того как один из сосудов был нагрет до  $200^\circ C$ , проведенный через некоторое время анализ содержания водорода показал, что в горячем сосуде его концентрация оказалась на 2-3% выше, чем в холодном.

Широкие исследования термодиффузии в различных газовых смесях были предприняты затем Иббсом, который наряду с устройствами, аналогичными тем, которые применялись в опытах Чепмена и Дутсона, использовал цилиндрический стеклянный сосуд, по оси которого располагалась платиновая спираль, нагреваемая током (рис. 9.1). Через отверстие  $A$  в сосуд впускалась однородная газовая смесь. Между спиралью и холодными стенками устанавливался поперечный температурный градиент, вызывающий термическую диффузию. В результате газ, выходящий через отверстие  $C$  из более холодных внешних частей сосуда, оказывается обогащенным одним компонентом, а газ, выходящий через отверстие  $D$ , другим.

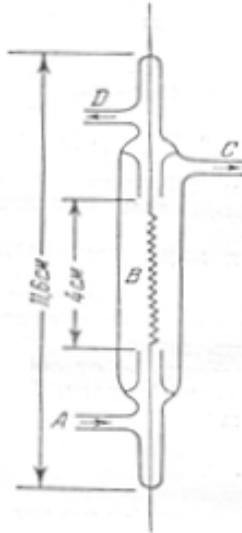


Рис. 9.1. Разделение движущейся газовой смеси методом термодиффузии, А – вход; В – нагреваемая платиновая спираль; С, D – выходы .

## Эффект разделения

Величину первичного эффекта разделения, возникающего в установившемся состоянии, когда эффект термодиффузии уравнивается обратным эффектом концентрационной диффузии, можно определить из условия обращения в нуль диффузионного потока  $(J_D)_1$  (9.1), что приводит к соотношению

$$\frac{dc}{dx} = -\alpha_T c(1-c) \frac{1}{T} \frac{dT}{dx} . \quad (9.3)$$

Для изотопных смесей тяжелых элементов, когда  $\alpha_T \ll 1$ , относительное изменение концентраций при разделении оказывается малым и произведение  $c(1-c)$  можно считать практически не меняющимся, положив его равным  $c_0(1-c_0)$ . Читателю, знакомому с понятием производной от функции, напомним, что  $(1/T)dT/dx = d \ln T / dx$ , где  $\ln T$  – натуральный логарифм от температуры. Тогда из интегрирования (9.3) следует

$$\Delta c = c' - c_0 = -\alpha_T c_0 (1 - c_0) \ln \frac{T'}{T_0} . \quad (9.4)$$

Это выражение можно сравнить с соотношением (6.9) главы 6, связывающим разность концентраций  $\Delta c$  с коэффициентом обогащения  $\epsilon'$ . При этом следует иметь в виду, что в рассматриваемом нами случае  $\alpha_T < 0$ . Поэтому если  $T' > T_0$ , то разность концентраций  $\Delta c > 0$  (легкий компонент концентрируется в горячей области) и коэффициент обогащения смеси определяется как

$$\epsilon' = |\alpha_T| \ln \frac{T'}{T_0} . \quad (9.5)$$

## Термодиффузионная колонна

Возможность практического использования явления термодиффузии для разделения изотопных и газовых смесей появилась после того как К. Клузиус и Г. Диккель в 1938 году показали, что единичный разделительный эффект может быть многократно увеличен за счет тепловых конвективных потоков, возникающих под действием архимедовых сил в поле силы тяжести. Как известно, при увеличении температуры в какой-либо области замкнутого объема плотность газа уменьшается и нагретый газ всплывает вверх, а его место занимает более холодный, опускающийся вниз в другой части объема. В этом проявляется эффект свободной конвекции, с которым мы часто сталкиваемся в повседневной жизни.

Аппарат, который применили Клузиус и Диккель, был удивительно прост [45]. Он представлял собой длинную вертикальную трубу, закрытую с обоих концов, по оси которой располагалась нихромовая проволока, нагреваемая электрическим током до высокой температуры. С внешней стороны цилиндр охлаждался потоком холодной воды. Благодаря термодиффузии молекулы легкого компонента смеси в некотором избытке накапливаются у горячей проволоки, где они вступают в

восходящий конвекционный ток, существующий вблизи проволоки. Наоборот, вблизи охлажденной стенки трубы существует нисходящий конвекционный ток, в котором имеется избыток молекул тяжелого компонента. Таким образом, легкий компонент накапливается в верхней части цилиндра, а тяжелый – в нижней, откуда и можно производить их отбор. Разумеется, существует определенное время установления стационарного состояния в системе (иногда весьма заметное), когда описанный выше эффект уравнивается обычной диффузией, связанной с возникшим продольным градиентом концентрации.

С помощью термодиффузионных колонн Клузиус и Диккель осуществили разделение разнообразных изотопных смесей. В их первоначальных опытах с колонной длиной 2,6 м было достигнуто частичное разделение изотопов неона. Для разделения изотопов хлора, который использовался в виде его газообразного соединения с водородом, они применили уже пять последовательно соединенных колонн общей длиной 36 м. При этом было достигнуто практически полное разделение изотопов  $^{35}\text{Cl}$  и  $^{37}\text{Cl}$ .

В последующие годы в лаборатории Клузиуса в Базеле были выделены изотопы  $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ,  $^{18}\text{O}$ , а также редкие изотопы ряда инертных газов ( $^{36}\text{Ar}$ ,  $^{38}\text{Ar}$ ,  $^{84}\text{Kr}$ ,  $^{86}\text{Kr}$ ,  $^{136}\text{Xe}$ ). Используемые при этом колонны имели различную конструкцию, наряду с проволочными колоннами применялись системы, образованные двумя концентрическими цилиндрами, имеющими разные температуры. Для обеспечения высокой чистоты изотопов (до 90%) использовалось соединение колонн в каскады. Разделением изотопов в термодиффузионных колоннах занимались и другие группы исследователей [45].

Теория разделительной колонны должна учитывать одновременно радиальный перенос компонентов за счет термодиффузии и обычной диффузии, а также продольные (вдоль оси колонны) конвекционный ток и концентрационную диффузию. Это обстоятельство делает теоретическое рассмотрение процессов в колонне довольно сложным, поскольку сводит его к решению систем дифференциальных уравнений в частных производных (т.е.

производных от температуры и концентрации по заданному направлению). Анализ соответствующей задачи, в том числе и при ряде упрощающих предположений, можно найти в специальных книгах, посвященных этому вопросу [ 44,45 ].

Один из главных выводов теории, который подтверждается и качественными соображениями, состоит в том, что термодиффузионная колонна функционирует как своеобразный противоточный каскад, составленный из последовательно соединенных элементарных делящих ступеней. В качестве последних могут рассматриваться выделенные малые объемы колонны, ограниченные по высоте плоскостями  $z$  и  $z + \Delta z$ , в которых происходит радиальное разделение смеси благодаря термодиффузии и обмен легким и тяжелым компонентом с соседними по высоте элементами за счет конвективного переноса и продольной диффузии. Разделительная эффективность колонны будет зависеть, как и для любого каскада, от числа этих непрерывно распределенных по высоте элементов, т.е. от длины колонны.

Из теории следует также целесообразность выбора сравнительно малого диаметра колонны (~2-3 см) или еще меньшего зазора между двумя концентрическими цилиндрами ( $\leq 1$  см), имеющими разные температуры. Этот зазор с большой точностью должен выдерживаться по всей длине колонны. Для оптимального разделения желательнее также поддерживать достаточно заметное давление газа (от 1 до 5 атм.) .

В разделе, посвященном истории Манхэттенского проекта, мы уже рассказывали об использовании термодиффузионных колонн для получения низкообогащенного  $^{235}\text{U}$ . Фактически это было первое крупномасштабное применение явления термодиффузии для производства изотопов. Напомним, что в качестве рабочего вещества в колоннах использовался жидкий гексафторид урана.

Термодиффузия в жидкостях изучена в меньшей степени, чем в газах, однако постоянная термодиффузии в жидких изотопных смесях оказывается, как правило, в 6-7 раз большей, чем в газах. Это обеспечивало довольно высокую эффективность колонн Абельсона, в которых производилось примерно 50 г обогащенного

урана в сутки. После того как в американском проекте было обеспечено надежное функционирование газодиффузионного производства для обогащения урана, от дальнейшего использования термодиффузии было решено отказаться из-за слишком высокого потребления энергии.

В настоящее время термодиффузионный метод применяется главным образом для производства малых количеств различных изотопов чрезвычайно высокой чистоты.

## **Эффект разделения при масс-диффузии**

В 1922 году будущий лауреат Нобелевской премии немецкий ученый Г. Герц предложил метод разделения газовой смеси с помощью диффузии в струе пара. Этот метод, получивший название *масс-диффузии*, основан на использовании различий в скорости диффузии компонентов изотопной смеси в потоке какого – либо третьего газа. В качестве такого газа удобно применять пары различных жидкостей, которые можно легко сконденсировать и отделить от разделяемой смеси. За счет диффузии против потока пара происходит увеличение концентрации легкого компонента смеси.

С использованием простой аппаратуры Герцу удалось практически полностью разделить смесь  $Ne - He$ , применяя в качестве третьего компонента водяной пар. Спустя 12 лет он несколько усложнил свою установку, объединив в одном устройстве диффузионный насос, разделительный элемент и генератор пара. Схема разделительного насоса Герца и способ соединения единичных устройств в каскад представлены на рис. 9.2. Пары рабочей жидкости (ртути) поступают в виде струи из испарителя 1 в пространство между соплом 2 и трубкой 3. Эта трубка делит поток на две части: центральная часть поступает в самую трубку, а периферийная - в область между трубкой 4 и и поверхностью конденсатора 5. Разделяемая газовая смесь подается снизу в трубку 4 и, двигаясь по ней вверх, диффундирует в струю пара. В результате элементарного эффекта разделения, о котором мы расскажем ниже, газ, поступающий в трубку 3, оказывается

обогащенным легким компонентом смеси. Легкая фракция по верхней соединительной трубке 3 переносится при этом к последующему элементу, а тяжелая по нижней трубке 6 – к предыдущему элементу, что и обеспечивает реализацию схемы противоточного каскада.

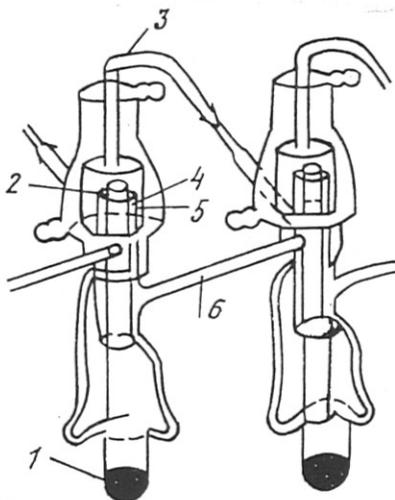


Рис. 9.2. Схема разделительного насоса Герца и способ соединения элементов в каскад.

Таким способом Герцу и другим исследователям в 1934-39 годах. удалось частично разделить изотопы Ne, Ar, N<sub>2</sub> и C (в виде CH<sub>4</sub>).

В последующие годы аппараты, использующие масс-диффузию, были существенно усовершенствованы, в их конструкцию были введены диафрагмы, препятствующие перемешиванию фаз и боковые конденсационные поверхности.

Теория единичного эффекта разделения при масс-диффузии может быть построена на основе уравнений диффузии для трехкомпонентной газовой смеси. Для этого достаточно воспользоваться полученным в главе 7 уравнением баланса импульса в форме (7.40), записывая его для случая трех

компонентов. Для компонента 1 соответствующее уравнение принимает вид

$$-\left(\frac{dp_1}{dx}\right)_D = \frac{kT}{D_{12}} \frac{n_1 n_2}{n} (u_1 - u_2) + \frac{kT}{D_{13}} \frac{n_1 n_3}{n} (u_1 - u_3) . \quad (9.6)$$

Два члена в правой части этого уравнения представляют собой среднее значение импульса, передаваемого при столкновениях от молекул первого компонента соответственно молекулам второго и третьего компонента. Как уже раньше говорилось, они называются *силами диффузионного трения*.

Аналогичные уравнения записываются и для двух оставшихся компонентов, только в их правой части фигурируют *силы трения* выделенного компонента относительно двух других.

Решение системы этих уравнений можно заметно упростить, если в смеси с паром (третий компонент) находятся два изотопа с малой относительной разницей масс молекул ( $m_2 - m_1 \ll m_1$ ).

Диффузионный поток легкого изотопа (компонент 1) в разделяемой смеси приближенно записывается в этом случае как [46]

$$J_{1D} = -Dn\xi \left[ \frac{dc}{dx} + \varepsilon c(1-c) \frac{1}{\xi} \frac{d\xi}{dx} \right] . \quad (9.7)$$

Здесь  $c$  — молярная доля (концентрация) легкого изотопа в газе,  $\xi$  — концентрация разделяемого газа в газопаровой смеси,  $D$  — некоторый обобщенный коэффициент диффузии.

Параметр  $\varepsilon$  ( $\varepsilon \ll 1$ ) имеет вид

$$\varepsilon = \frac{D_{13} - D_{23}}{D_{13}} \approx \frac{m_2 - m_1}{2m_1} \frac{m_3}{m_3 + m_1} .$$

Заметим, что переход от относительной разницы в коэффициентах диффузии к относительной разнице в массах молекул можно совершить благодаря тому, что

$$D_{ik} \sim \sqrt{\frac{(m_i + m_k)}{m_i m_k}} .$$

Теперь становится понятным, почему возникает эффект разделения. В диффузионном потоке (9.7) наряду с градиентом

концентрации разделяемого компонента появляется еще одно слагаемое, пропорциональное градиенту концентрации газа в паре. Ситуация становится очень похожей на эффекты разделения при термодиффузии и газовой диффузии через пористую перегородку, где дополнительные слагаемые в диффузионном потоке связаны с градиентами температуры либо давления.

## **Масс-диффузионная колонна**

Результаты по разделению смесей были заметно улучшены с переходом к противоточным масс-диффузионным колоннам. В них весь пар, образовавшийся в испарителе, используется для создания поперечного (т.е. направленного по радиусу колонны) противотока между паром и разделяемой газовой смесью (рис. 9.3). Пар поступает в колонну через отверстия в стенке перфорированной (проницаемой) трубки 1 равномерно по высоте колонны и конденсируется на охлаждаемой внутренней стенке колонны. В радиальном направлении возникает элементарный масс-диффузионный эффект разделения, который, как и в термодиффузионной колонне, можно умножить, создавая продольное циркуляционное течение. Этому способствует введение пористой диафрагмы 2 между поверхностью, через которую подается пар, и конденсирующей поверхностью 3, которая регулирует вертикальные потоки газа и предотвращает их перемешивание.

Эффективные масс-диффузионные колонны были созданы с участием советских ученых. В Сухумском физико-техническом институте в 1958 году Г. Барвихом и Р. Кучеровым была разработана колонна, в которой циркуляционный поток регулировался за счет изменения величины дополнительного к основному потока пара, подаваемого в колонну.

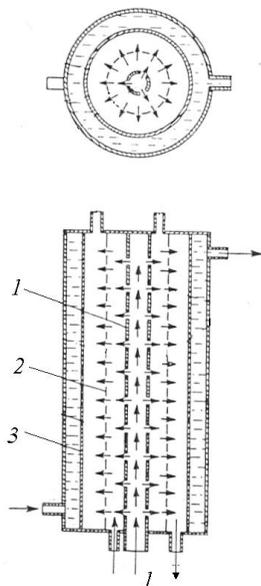


Рис. 9.3. Схема противоточной масс-диффузионной колонны.

Достигнутый на этой колонне коэффициент разделения изотопов неона  $\alpha$  (с парами ксилола, используемыми в качестве третьего газа) был равен 9, а при обогащении  $\text{CH}_4$  изотопом  $^{13}\text{C}$  (с парами нитробензола)  $\alpha=2.6$ . Каскад из 10 колонн позволял получать в сутки  $400 \text{ см}^3 \text{ Ne}$  с содержанием 99% изотопа  $^{22}\text{Ne}$ . Это вывело масс-диффузию в число перспективных методов разделения изотопов.

В Московском инженерно-физическом институте Б.Николаевым и Г. Сулаберидзе с сотр. в 1966-68 годах были созданы еще более эффективные колонны с использованием в качестве парообразователя металлической ртути, которая имеет ряд преимуществ перед обычно используемыми органическими жидкостями, хотя и создает некоторые трудности в эксплуатации из-за высокой химической активности. Эти трудности были преодолены выбором соответствующих материалов. В

предложенной схеме аппарата удалось организовать циркуляцию газа без дополнительных внешних источников возбуждения, что заметно упростило его конструкцию. Максимальный фактор разделения изотопов неона в этой колонне составил  $\alpha=27$  и на трехступенчатой установке была достигнута концентрация  $^{22}\text{Ne}$  равная 97%. При рассмотрении теории умножения эффекта разделения в масс-диффузионной колонне за счет циркуляционного движения вдоль оси колонны также возникает почти полная аналогия с разделением в термодиффузионной колонне Клузиуса и Диккеля.

Некоторые дополнительные трудности при анализе эффекта возникают из-за того, что парогазовая смесь оказывается трехкомпонентной, а также из-за усложнения картины гидродинамического течения смеси благодаря наличию пористой диафрагмы. Заинтересованный читатель может более подробно ознакомиться с теорией разделения в масс - диффузионной колонне в учебном пособии [46].

*... У нас была распространена точка зрения, согласно которой возможности метода центрифугирования стоят значительно выше возможностей метода диффузии .*

**И.В.Курчатов**

## **ГЛАВА 10. ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ МЕТОД РАЗДЕЛЕНИЯ**

### **Немного истории**

Ранее мы уже рассказывали о том, как создавался промышленный метод разделения изотопов урана с использованием высокоскоростных газовых центрифуг. Здесь мы обратимся к физическим основам центробежного метода. Но сначала немного истории.

Идея использования силовых полей (гравитационных или центробежных, возникающих во вращающемся газе) для разделения компонентов смеси была высказана еще Г. Бредигом в Германии в 1896 году. Вскоре после открытия изотопов Астон и Линдеман в 1919 году, предложили применить ту же идею для разделения изотопов. Используя для оценок барометрическую формулу, описывающую изменение плотности газа с высотой над поверхностью Земли, они пришли к выводу, что в пробах неона, взятых на уровне земли и на высоте 30 км изотопный состав будет существенно различным.

Барометрическая формула является прямым следствием так называемого распределения Больцмана, которое описывает равновесное распределение плотности газа в пространстве при наличии действующего на молекулы газа внешнего силового поля. Если  $U$  — потенциальная энергия молекул в таком поле, то изменение плотности частиц в пространстве имеет вид

$$n(r) = n(0) \exp \left[ -\frac{U(r)}{kT} \right], \quad (10.1)$$

где  $n(0)$  — значение плотности в точке  $r_0$ , где  $U(r_0) = 0$ .

Рассмотрим в качестве примера вертикально ориентированный цилиндрический столб бинарной газовой смеси, расположенный в поле силы тяжести Земли. Если ось  $z$  направить вверх, отсчитывая ее от нижнего торца столба, то  $U_i = m_i gz$  и равновесные распределения плотностей компонентов смеси примут вид

$$n_1(z) = n_1(0) \exp\left(-\frac{m_1 gz}{kT}\right), \quad n_2(z) = n_2(0) \exp\left(-\frac{m_2 gz}{kT}\right). \quad (10.2)$$

Коэффициент разделения  $\alpha$  на высоте  $z = h$  определяется формулой

$$\alpha = \frac{n_2(h)/n_1(h)}{n_2(0)/n_1(0)} \quad (10.3)$$

или

$$\alpha = \exp\left(-\frac{m_2 - m_1}{kT} gh\right). \quad (10.4)$$

На самом деле, опытная проверка утверждения о различных значениях отношения концентраций компонентов смеси на разных высотах оказывается фактически невозможной, поскольку барометрическая формула получена при условии постоянства температуры, а последняя меняется с высотой немонотонно (до высоты  $\sim 20$  км сначала уменьшается, а потом снова растет). Кроме того, за счет конвекционных потоков возникает заметное перемешивание в атмосфере, которое может полностью подавить предполагаемый эффект. Впоследствии это нашло свое подтверждение в экспериментах по определению состава атмосферы на разных высотах, которые были выполнены после Второй мировой войны с использованием захваченных у немцев ракет Фау-2,

В статье, опубликованной в 1937 году, советский ученый, будущий академик Ю.Б. Харитон изложил основы теории прямоточной бесциркуляционной центрифуги для разделения газовой смеси, которую предлагалось использовать, в частности, для обогащения воздуха кислородом. В 1939 году нобелевский лауреат Г. Юри предложил идею противоточной газовой центрифуги, внутри ротора которой создается осевая циркуляция

газа за счет тепловой конвекции. Как и в случае термодиффузионных и масс-диффузионных колонн, наличие такой циркуляции приводит к преобразованию радиального эффекта разделения в осевой, т.е. к многократному умножению эффекта. Некоторые теоретические оценки и конструкция такой центрифуги рассматривались немецкими учеными Мартином и Куном. Наконец в 1940 году американцем К. Коэном была разработана теория разделения изотопов в противоточной циркуляционной центрифуге на основе метода, аналогичного тому, который применялся Ферри и Джонсом в теории термодиффузионной колонны.

Первые экспериментальные результаты с использованием центробежного метода получил в 1938 году Дж. Бимс в университете Вирджиния (США): с помощью разработанной им центрифуги он разделил изотопы хлора, получив коэффициент разделения  $\alpha = 1,13$ .

Дальнейшее развитие событий известно. Попытки использовать центрифуги для разделения изотопов урана предпринимались в Германии и США. На первой стадии Манхэттенского проекта, были изготовлены и испытаны несколько отдельных аппаратов, однако промышленного осуществления этот метод не получил. О том, как проходила работа над центробежным методом в рамках Советского атомного проекта, было подробно рассказано выше.

## **Центрифуга. Физика явлений**

Обсудим теперь вопрос о том, какие физические явления происходят в газовой центрифуге. Основным элементом газовой центрифуги является ротор (тонкостенный и ограниченный торцами сверху и снизу цилиндр), вращающийся с очень высокой скоростью в вакуумной камере. Внутри ротора находится разделяемая изотопная смесь (в случае урана — газообразный гексафторид урана), которая вовлекается во вращение вместе с ротором.

Рассмотрим цилиндрический объем газовой смеси, вращающийся вокруг продольной оси  $z$  с постоянной угловой скоростью  $\omega$  (рис. 10.1). Линейная (окружная) скорость вращения

газа  $v$  на расстоянии  $r$  от оси определяется формулой  $v = \omega r$ . Как известно из механики, в системе отсчета, связанной с вращающимся газом, на молекулы смеси действуют центробежные силы, пропорциональные массе молекул.

По определению, центробежная сила равна взятому с обратным знаком произведению массы  $m$  на центростремительное ускорение  $v^2/r$  или  $\omega^2 r$ , т.е.  $F_{цб} = -m\omega^2 r$ . Знак минус означает, что эта сила направлена противоположно центростремительному ускорению, т.е. от центра к периферии. Мы нередко встречаемся с ее проявлением в обыденной жизни, достаточно вспомнить, как прижимает нас к дверце автомобиля при его поворотах на криволинейном отрезке пути.

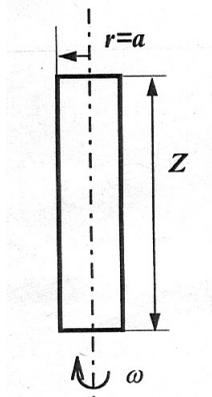


Рис.10.1. Вращение цилиндрического объема газа

Пока центрифуга не вращается, молекулы заполняющего ее газа равномерно распределены по пространству благодаря их тепловому движению. После того как ротор центрифуги приведен во вращение, действие центробежных сил на молекулы во вращающемся газе приводит к тому, что молекулы как бы отбрасываются от оси ротора к периферии. В результате при установившемся вращении газа внутри ротора возникает неравномерное по радиусу распределение плотности газовой смеси. При этом давление газа в периферийной области ротора

заметно превышает давление на его оси. Поскольку центробежные силы по разному (пропорционально массе молекул) действуют на компоненты смеси, одновременно происходит радиальное разделение молекул разного сорта. Относительная плотность (концентрация) молекул тяжелого компонента возрастает на периферии ротора, а молекулы легкого компонента накапливаются на оси. Как в любом разделительном устройстве такого типа, этому препятствует обратная диффузия компонентов смеси, которая возникает из-за появившихся в газе градиентов их концентрации. Спустя некоторое время во вращающемся газе устанавливается диффузионное равновесие, когда полные диффузионные потоки компонентов обращаются в нуль, и внутри ротора возникает равновесное распределение плотностей (концентраций) компонентов.

Для количественного описания рассмотренных нами явлений, как и в предыдущих главах, удобно воспользоваться уравнениями баланса импульса для компонентов смеси в форме (7.40), где дополнительно учтены действующие на молекулы внешние силы.

Уравнения баланса импульса для компонентов бинарной газовой смеси записываются в этом случае в виде

$$-\frac{dp_1}{dr} = \frac{n_1 n_2 kT}{nD_{12}}(u_1 - u_2) - m_1 n_1 \omega^2 r, \quad (10.5)$$

$$-\frac{dp_2}{dr} = -\frac{n_1 n_2 kT}{nD_{12}}(u_1 - u_2) - m_2 n_2 \omega^2 r. \quad (10.6)$$

Согласно этим уравнениям градиенты парциального давления компонентов уравновешиваются не только силой диффузионного трения компонентов, но и внешней (центробежной) силой, действующей на молекулы компонентов.

Суммирование уравнений (10.5) и (10.6) приводит к условию механического равновесия смеси

$$\frac{dp}{dr} = \rho \omega^2 r, \quad (10.7)$$

где  $p = p_1 + p_2$  — полное давление и  $\rho = m_1 n_1 + m_2 n_2$  — массовая плотность смеси. Из уравнения состояния газа (7.2) следует, что  $\rho = p \bar{m} / kT$ , где  $\bar{m} = \rho / n$  — средняя масса молекул смеси.

Для изотопных смесей  $\bar{m}$  практически не зависит от концентраций, и уравнение (10.7) можно переписать как

$$\frac{dp}{p} = \frac{\bar{M}}{RT} \omega^2 r dr, \quad (10.8)$$

где  $\bar{M}$  – средняя молярная масса смеси.

В результате интегрирования слева и справа уравнения (10.8) мы приходим к результату

$$\ln \frac{p}{p_0} = \frac{\bar{M}}{2RT} (\omega r)^2,$$

откуда следует

$$p(r) = p_0 \exp \left[ \frac{\bar{M}}{2RT} (\omega r)^2 \right], \quad (10.9)$$

где  $p_0$  – давление газа на оси ротора.

Для достаточно высоких линейных скоростей вращения газа давление, рассчитанное по формуле (10.9), меняется от центра к периферии очень значительно, так что прилегающая к оси часть объема центрифуги находится обычно в области очень низких давлений. Для примера укажем, что для смеси  $\text{UF}_6$  при  $T = 300\text{K}$  и характерной окружной скорости  $v = 400\text{ м/с}$  отношение  $p(R)/p_0$  равно  $5,5 \cdot 10^4$ . Переход к скорости  $v = 500\text{ м/с}$  увеличивает это отношение почти на три порядка, т.к.  $p(R)/p_0 = 2,5 \cdot 10^7$ .

Для того чтобы получить распределение плотности компонентов смеси по радиусу, найдем значения диффузионных потоков компонентов. Согласно уравнению (7.30)

$$(J_D)_1 = \frac{n_1 n}{n^2} (u_1 - u_2).$$

Тогда из уравнения (10.5) следует

$$J_{D1} = -J_{D2} = -D_{12} \left( \frac{dn_1}{dr} - m_1 n_1 \omega^2 r \right). \quad (10.10)$$

В состоянии полного равновесия диффузионные потоки обращаются в нуль. Это означает, что радиальный поток частиц каждого из компонентов, вызванный воздействием на частицы центробежных сил, уравнивается обратным ему потоком диффузии за счет градиента парциальной плотности компонента. В результате приходим к условию

$$\frac{dn_i}{dr} = m_i n_i \omega^2 r, \quad i = 1, 2, \quad (10.11)$$

откуда после такой же, как и раньше, операции интегрирования получаем

$$n_i(r) = n_i(0) \exp \left[ \frac{M_i}{2RT} (\omega r)^2 \right]. \quad (10.12)$$

Отметим, что подобное же выражение следует непосредственно из распределения Больцмана (10.1), записываемого для каждого компонента смеси. Как известно, для газа, вращающегося как целое с угловой скоростью  $\omega$ , потенциальная энергия молекул имеет вид  $U_i = -m_i \omega^2 r^2 / 2$ .

Справедливость формулы Больцмана в нашем случае означает, что первичный эффект разделения в центрифуге возникает фактически в условиях термодинамического равновесия, что качественным образом отличает центробежный метод от других молекулярно-кинетических методов разделения изотопов, где процессы являются существенно необратимыми.

## Эффект разделения

Определим теперь коэффициент разделения смеси отношением

$$\alpha = \frac{n_1(0) / n_2(0)}{n_1(R) / n_2(R)}, \quad (10.13)$$

где  $R$  – радиус цилиндра. Концентрация легкого компонента смеси (индекс “1”) выше на оси цилиндра, чем на периферии, поэтому именно при таком отношении плотностей компонентов выполняется условие  $\alpha > 1$ .

С учетом (10.12), имеем

$$\alpha = \exp \frac{(M_2 - M_1)}{2RT} (\omega R)^2 . \quad (10.14)$$

Мы получаем важный результат: коэффициент разделения смеси экспоненциально зависит от абсолютной разности молекулярных масс компонентов и от квадрата окружной скорости вращения газа. Для сравнительно малых коэффициентов обогащения  $\varepsilon$ , можно использовать разложение экспоненты в (10.14) в ряд ( $e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2} + \dots$ ). В этом случае, пренебрегая квадратичными членами, имеем

$$\varepsilon = \alpha - 1 \approx \frac{M_2 - M_1}{2RT} (\omega R)^2 . \quad (10.15)$$

В табл. 10.1 приводятся значения  $\varepsilon$  в центрифуге, заполненной гексафторидом урана при  $T = 300\text{K}$ , в зависимости от линейной (окружной) скорости вращения газа на периферии  $v = \omega R$ . Из этих данных следует, что при достаточно высоких окружных скоростях вращения, например при  $v = 500 \text{ м/с}$ , значения радиального коэффициента обогащения оказываются почти в 40 раз больше, чем идеальный коэффициент обогащения в газодиффузионном методе.

Таблица 10.1

Зависимость коэффициента обогащения в центрифуге от скорости вращения

Линейная скорость вращения $v$ , м/с	$\alpha$	$\varepsilon$	$p / p_0$
400	1,0975	0,0975	$5,5 \cdot 10^4$
500	1,156	0,156	$2,5 \cdot 10^7$
600	1,233	0,233	$4,6 \cdot 10^{10}$
700	1,329	0,329	$3,3 \cdot 10^{14}$

Мы уже рассказывали, что в основу российского центробежного производства по разделению изотопов были положены короткие *подкритические* центрифуги с жестким ротором. Напомним, что

деление центрифуг на *подкритические* и *надкритические* связано с известным явлением, нередко встречающимся в технике. Речь идет о так называемых изгибных колебаниях, например, колебаниях валов мощных турбин, которые возникают при их запуске и выведении на номинальное число оборотов. Любая сложная механическая система характеризуется набором так называемых собственных частот колебаний или резонансных частот. Если частота вращения вала начинает приближаться к одной из этих частот, возникают резонансные изгибные колебания, амплитуда которых может достигнуть угрожающе больших величин и привести к разрушению вала. Оценки показали, что в случае реальных центрифуг такая ситуация, когда ротор, не достигнув номинального числа оборотов, подходит к первому изгибному резонансу, может возникнуть, если длина ротора в 4–5 раз превышает его диаметр [24]. Этим приближенным условием и определяется выбор размеров ротора подкритических центрифуг.

Принципиальная схема противоточной подкритической газовой центрифуги представлена на рис. 10.2.

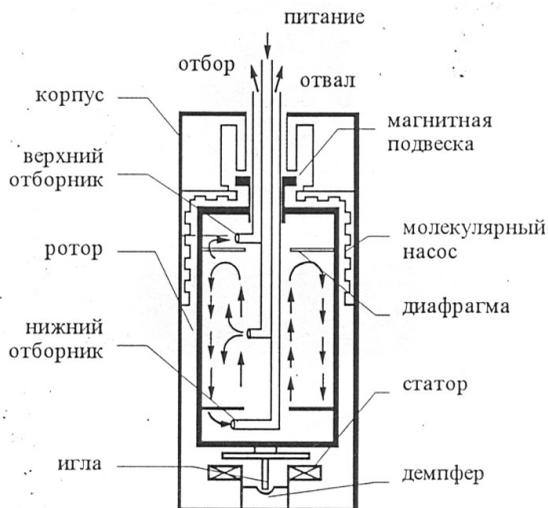


Рис. 10.2. Схема газовой центрифуги

В ней сохранены основные идеи Штеенбека: игольчатый подшипник ( игла, опирающаяся на подпятник из очень прочного материала с масляным демпфированием) и магнитный подшипник (кольцевой магнит в верхней части ротора, удерживающий ротор в вертикальном положении). Для приведения центрифуги во вращение используется устройство, организованное по типу асинхронного двигателя: во внутреннюю часть цилиндра центрифуги вставлен концентрический стальной диск, а статором служит внешняя катушка. Вращающееся поле катушки сообщает диску крутящий момент, достаточный для достижения скорости вращения ротора порядка нескольких тысяч оборотов в секунду.

Чтобы практически устранить трение о воздух, цилиндр центрифуги помещают внутри кожуха, в котором обеспечивается вакуум, создаваемый по принципу молекулярного насоса при вращении цилиндра относительно стенки кожуха, в которой делаются винтообразные желобки.

Ротор центрифуги разбит на три области: основную зону разделения, занимающую большую часть объема, и камеры верхнего и нижнего отборника, отделяемые от основной зоны диафрагмами. В противоточной центрифуге создается поток циркуляции в направлении параллельном оси цилиндра. Как уже говорились ранее, каждый небольшой цилиндрический элемент газа по высоте центрифуги можно рассматривать при этом как некоторую ступень каскада (подобно ступени в каскаде диффузионных машин). В результате соединения таких ступеней радиальный эффект разделения преобразуется в осевой и происходит умножение эффекта разделения. Разница концентраций легкого и тяжелого компонентов, возникшая первоначально в радиальном направлении, устанавливается теперь между верхним и нижним торцами ротора. Естественно, что суммарный эффект обогащения в этом случае оказывается пропорциональным длине ротора. В реальных конструкциях центрифуг осевой перепад концентрации в несколько раз превышает радиальный

На рис. 10.2 направление потока циркуляции соответствует переносу легкой фракции к верхнему отборнику, а тяжелой – к нижнему. Поток питания вводится обычно вблизи середины ротора по его оси. Сама циркуляция возбуждается за счет торможения

вращающегося газа при его взаимодействии с неподвижной отборной трубкой, предназначенной для вывода тяжелой фракции из периферийного уплотненного слоя газа. Поток циркуляции можно создать и за счет тепловой конвекции, если существует разность температур между верхним и нижним концом ротора. Подавая питание смеси вдоль оси ротора и организуя отбор легкой и тяжелой фракции из верхней и нижней его части, остается лишь соединить одиночные центрифуги в каскады.

Как и любое разделительное устройство, образующее элемент каскада, центрифуга характеризуется коэффициентом разделения, величиной потока питания и коэффициентом деления потока между отбором и отвалом (см. главу 6). Для обычных подкритических центрифуг, каждая из которых обеспечивает сравнительно небольшие коэффициенты обогащения, оптимальное деление потоков обычно близко к 0,5. Для длинных надкритических центрифуг с относительно большим коэффициентом обогащения деление потоков может оказаться сильно несимметричным. Использование общей теории каскадов позволяет в любом из этих случаев обеспечивать оптимальное соединение центрифуг в каскады и при известной разделительной способности центрифуг определять их необходимое количество для получения целевого продукта заданной концентрации. При этом концентрация обедненной части (отвала) определяется экономическими соображениями с учетом стоимости сырья и работы разделения. [24].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Заканчивая эту книгу, обнаруживаешь, что тема ее неисчерпаема. Мы сумели рассказать в ней лишь о главных *молекулярно-кинетических* методах разделения изотопов. Разумеется, отдельного обсуждения заслуживали бы *физико-химические методы*, применяемые при разделении изотопов легких элементов. Этой темы мы лишь слегка коснулись при обсуждении проблем получения тяжелой воды. Особая тема — новые перспективные методы разделения изотопов, например, *лазерный* и *плазменные* методы (плазменная центрифуга, ионный циклотронный резонанс и др.), получившие свое развитие в последние годы. К сожалению, ограниченный объем книги не позволил уделить внимание этим вопросам. Заинтересованный читатель может обратиться к специальной литературе, особенно к вышедшей в Москве в издательстве Физматлит в 2005 году двухтомной монографии «Изотопы» под редакцией В.Ю. Баранова [38]. Там же можно узнать о многочисленных практических применениях изотопов.

Успешное развитие и промышленное становление газодиффузионного, центробежного и электромагнитного методов разделения изотопов были связаны, как мы видели, с необходимостью в производстве оружейного урана. Лишь в последние десятилетия мощности разделительных производств, созданных в ряде развитых стран мира, были перепрофилированы в основном на выпуск слабообогащенного урана для целей атомной энергетики. Следует отметить, что *газодиффузионный метод* разделения изотопов, который, был вначале основным в промышленном обогащении урана, фактически, так и не нашел применения в разделении изотопов других элементов. На смену ему своевременно пришел более экономичный и эффективный *центробежный метод*. За прошедшее время в нашей стране и за рубежом были созданы образцы различных центрифуг, специально приспособленных для разделения не только изотопов урана, но и широкого спектра химических элементов, для которых существуют подходящие газообразные соединения.

Обращаясь к истории становления и промышленного освоения различных методов разделения изотопов, нетрудно усмотреть определенную логику в их развитии, в их конкуренции между собой, в том, как они сменяют и взаимно дополняют друг друга по мере возникновения новых направлений науки и техники, создания новых материалов и технологий. Каждый из них выбирает свою «нишу» для разделения изотопов именно тех элементов, где его применение оказывается наиболее целесообразным и экономически оправданным.

Появление новых перспективных методов разделения изотопов связано с бурным развитием в последние десятилетия лазерной физики и техники, а также проводящихся широким фронтом исследований газового разряда и высокотемпературной плазмы.

Особое место заняли в настоящее время *оптические (лазерные)* методы разделения изотопов, основанные на изотопических эффектах в спектрах поглощения атомов и молекул. Преимущество этих методов состоит в их высокой избирательности и универсальной применимости для разделения изотопов практически всех химических элементов. Как известно, лазеры или источники когерентного стимулированного оптического излучения были созданы в начале 60-х годов прошлого столетия. Они нашли широкое применение в самых различных областях науки, и. техники. Высокая интенсивность импульсного лазерного излучения позволила ученым разработать ряд методов активного изотопически селективного воздействия на атомы и молекулы. Одним из них является метод лазерного разделения изотопов в атомарных парах, получивший в зарубежных исследованиях название AVLIS (Atomic Vapour Laser Isotope Separation). Другой метод MLIS (по первому английскому слову-Molecular) основывается на изотопически-селективной фотодиссоциации молекул лазерным излучением. Подробное обсуждение этих методов можно найти в упомянутой уже книге [38]. Здесь достаточно лишь отметить, что в течение последних 30 лет в целом ряде стран были развернуты масштабные исследования лазерных методов разделения изотопов, позволившие вплотную приблизиться к их промышленной реализации. В нашей стране, например, на основе метода селективной многофотонной

диссоциации молекул фреона-22 создана и действует в г. Калининграде промышленная установка для разделения изотопов углерода, предназначенная для получения  $\text{CO}_2$ , обогащенного до 30-40 % по изотопу углерод-13.

Что касается *плазменных методов* разделения изотопов, то они находятся пока на стадии технологических разработок и демонстрационных экспериментов. Так, *плазменная центрифуга*, в которой используется вращающаяся в электрическом и магнитном полях смесь ионизованных газов, создает возможность получения гораздо более высоких окружных скоростей вращения газов. Кроме того, она может иметь преимущество перед обычным центробежным методом в случае разделения изотопов элементов, не имеющих газообразных соединений с высокой упругостью пара. Другой плазменный метод - метод *ионного циклотронного резонанса* обеспечивает в одном цикле разделения получение продукта с очень высокой степенью обогащения. Для изотопов некоторых химических элементов он может составить конкуренцию электромагнитному методу, отличаясь от него большей производительностью. Подробнее о плазменных методах разделения изотопов можно узнать из недавно вышедшей книги [47].

В заключение заметим, что наша книга обращена в основном к молодым читателям. Автор надеется, что рассказанное в ней пробудит их любознательность и интерес к проблемам атомной науки и техники и заставит серьезно подумать над своим будущим призванием в этой области.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Содди Ф. История атомной энергии. М.: Атомиздат, 1979.
2. Бронштейн М. Атомы и электроны. М.: Наука, 1980 .  
( Библиотечка Квант, Вып.1).
3. Манолов К.,Тютюнник В. Биография атома. М.: Мир, 1984.
4. Пономарев Л.И. Под знаком кванта. М.: Физматлит, 2005.
5. Месси Г. Новая эра в физике. М.: Госатомиздат,1963.
6. Тригг Дж. Физика XX века. Ключевые эксперименты. М.: Мир, 1978.
7. Ирвинг Д. Атомная бомба Адольфа Гитлера. Вирусный корпус / пер. с англ. М.: Издатель Быстров, 2006.
8. Кларк Р. Рождение бомбы. М.: Госатомиздат,1962.
9. Смит Г.Д. Атомная энергия для военных целей: Официальный отчет о разработке атомной бомбы под наблюдением правительства США. М.: Трансжелдориздат,1946.
10. Гровс Л. Теперь об этом можно рассказать. М.: Атомиздат, 1964.
11. Круглов А. Как создавалась атомная промышленность в СССР. М.: ЦНИИАТОМИНФОМ,1995.
12. Создание первой советской ядерной бомбы. М.: Энергоатомиздат, 1995.
13. Труды Межд. симпозиума: Наука и общество История советского атомного проекта (40-е–50-е годы). М.:ИздАТ,1997,Т.1.
14. Гончаров Г.А., Рябев Л.Д. О создании первой отечественной атомной бомбы // Успехи физических наук. 2001,Т. 171, №1, С.79.
15. Синев Н.М. Обогащенный уран для атомного оружия и энергетики. М.: ЦНИИАТОМИНФОРМ,1992.
16. Прусаков В.Н., Сазыкин А.А. К истории проблемы обогащения урана в СССР // Труды Межд. симпозиума: Наука и общество. История Советского атомного проекта (40-е – 50-е годы). М.: ИздАТ.1997, Т.1, С.156.
17. Петросьянц А.М. К истории получения высокообогащенного урана на комбинате 813 – в кн. Создание первой советской ядерной бомбы. М.: Энергоатомиздат, 1995 ,С.249.

18. Соловьев Г.С. История и состояние промышленного разделения изотопов в Российской Федерации // Изотопы: свойства, получение, применение / под ред. В.Ю. Баранова. М.: Физматлит. 2005, Т.1, С.128 .
19. Артемов.Е.Т, Бедель А.Э. Укрощение урана. УЭХК, Новоуральск, 1999.
20. Кошечев Н.А., Дергачев В.А. Электромагнитное разделение изотопов и изотопный анализ. М.: Энергоатомиздат,1985.
21. Симоненко Д.Л. Краткое описание первых экспериментальных работ по разделению изотопов урана в СССР – в кн. История Советского атомного проекта, вып. 1, М.: Янус-К, 1998, С.135 .
22. Циппе Г. История и современное состояние технологии газовых центрифуг // Изотопы: свойства, получение, применение, / под ред. В.Ю. Баранова. М.: Физматлит. 2005, Т.1, С.146.
23. Аббакумов Е.И., Баженов В.А., Вербин Ю.В. и др., Разработка и промышленное применение газовых центрифуг для обогащения урана в СССР // Атомная энергия. 1989, Т.67, С.255.
24. Сенченков А.П., Сенченков С.А., Борисевич В.Д., Газовые Центрифуги// Изотопы: свойства, получение, применение / под ред. В.Ю. Баранова. М.: Физматлит. 2005, Т.1, С.168.
25. Разработка и создание газоцентрифужного метода разделения изотопов в СССР (России). С.-Петербург; ЛНПП “Облик”,2000.
26. Штеенбек М. Путь к прозрению// Пер. с нем., М.:Наука,1988.
27. Шемля М., Перье Ж. Разделение изотопов / пер. с фр., М.: Атомиздат, 1980 .
28. Производство тяжелой воды/ пер. с англ.,М.: ИИЛ,1961.
29. Андреев Б.М.,Зельвенский Я.Д., Катальников С.Г.. Разделение стабильных изотопов физико-химическими методами. М.: Энергоатомиздат, 1982.
30. Андреев Б.М., Магомедбеков Э.П. и др. Разделение изотопов биогенных элементов в двухфазных системах. М.: ИздАТ, 2003.
31. Харитон Ю.Б., Адамский В.Б., Смирнов Ю.Н., О создании советской водородной (термоядерной) бомбы // Труды Межд. симпозиума: Наука и общество. История Советского атомного проекта (40-е –50-е годы). М.: ИздАТ. 1997, Т.1, С.200.

32. Гончаров Г.А. Основные события истории создания водородной бомбы в СССР и США // Успехи физических наук, 1996, Т. 166, №10, С.1095.
33. Воронов Г.С. Штурм термоядерной крепости. М.: Наука, 1985 . (Библиотечка Квант, Вып.37).
34. Мирнов С.В. Энергия из воды. Популярно об управляемом термоядерном синтезе. М.: МИФИ, 2007.
35. Ядерный топливный цикл за рубежом в 2005-2006 гг // Обзор, М.: ЦНИИАТОМИНФОРМ, 2006 .
36. Борисевич В.Д., Борман В.Д., Сулаберидзе Г.А., Тихомиров А.В. Токманцев В.И.. Физические основы разделения изотопов в газовой центрифуге. М.:МИФИ, 2005.
37. Филимонов С.В. Сортировка атомов в масштабе цивилизации// Атомная стратегия, № 47, С.8 ,2010.
38. Изотопы: свойства, получение, применение / Под ред. В.Ю. Баранова., М.: Физматлит. 2005,Т. 1,2.
39. Сулаберидзе Г.А., Палкин В.А, Борисевич В.Д., Борман В.Д., Тихомиров А.В. , Теория разделения изотопов в каскадах, М.: МИФИ, 2007.
40. Бриголи.Б. Теория каскадов // . Обогащение урана Под ред. С. Виллани, / пер. англ., М.:Энергоатомиздат,1983.
41. Розен А.М. Теория разделения изотопов в колоннах. М.: Атомиздат, 1960.
42. Жданов В.М. Явления переноса в газах и плазме. М.:МИФИ, 2008.
43. Мейсон Э.,Малинаускас А. Перенос в пористых средах: Модель запыленного газа/ Пер. с англ. М.:Мир.1986.
44. Грю К.Э, Иббс Т.Л. Термическая диффузия в газах. М.: ГИТТЛ, 1956.
45. Джонс К., Ферри В. Разделение изотопов методом термодиффузии. М.: ИЛ, 1947.
46. Николаев Б.И., Сулаберидзе Г.А. Разделение изотопов в масс-диффузионных колоннах. М.: МИФИ, 1990.
47. Потанин Е.П, Борисевич В.Д. Физические основы разделения изотопов плазменными методами. М.: МИФИ, 2008.

Владимир Михайлович Жданов

## **ТАЙНЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ**

Научно-популярное издание

Редактор Т.В. Волвенкова

Подписано в печать 15.12.2010. Формат 60x84 1/16

Уч.-изд.л. 13,5. Печ.л. 13,5. Тираж 200 экз.

Изд. № 1/2/70. Заказ № 10

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».  
115409, Москва, Каширское ш., 31

ООО «Полиграфический комплекс «Курчатовский».  
144000, Московская область, г. Электросталь, ул. Красная, д. 42



Рис. 3.2. Панорама газодиффузионного завода К-25 в Ок-Ридже



Рис.4.2. Блок газодиффузионных машин на Уральском электрохимическом комбинате (УЭХК)

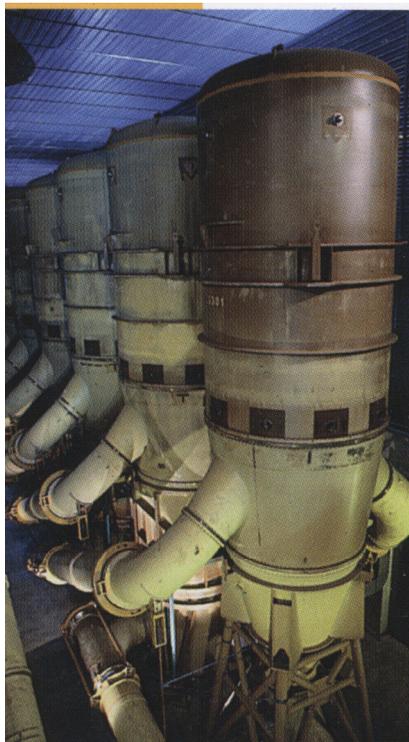


Рис.5.1. Диффузионная ступень французского завода в Трикастене

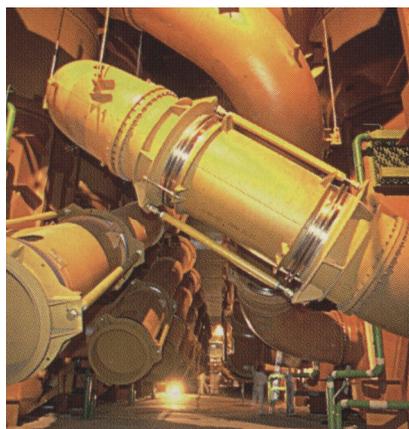


Рис.5.2. Элементы каскада французских диффузионных машин



Рис.5.3. Панорама модуля центрифужного каскада на УЭХК



Рис.5.4. Панорама газоцентрифужного завода в Кейпенхорсте (объединение URENCO)

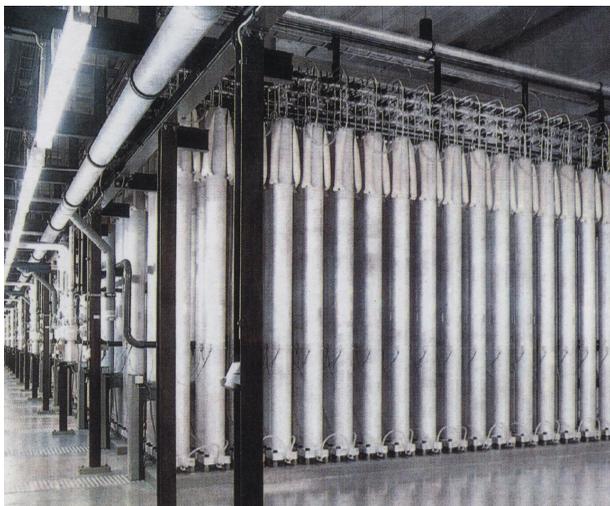


Рис.5.5. Участок центрифужного завода Гронау (URENCO)



Рис.5.6. Участок опытного каскада американских центрифуг