

02;04;07;12

Получение высокообогащенных изотопов ртути фотохимическим методом

© Ю.В. Вязовецкий, А.П. Сенченков

Российский научный центр "Курчатовский институт",
123182 Москва, Россия

(Поступило в Реакцию 2 августа 1996 г.)

В России создана автоматическая установка "Фотон-М" для производства изотопов ртути. Получение изотопов осуществляется с использованием фотохимической реакции возбужденных атомов ртути с кислородом в присутствии бутадиена-1.3. В связи с этим рассмотрены возможности разделения всех изотопов ртути, в том числе изотопов с перекрывающимися контурами резонансной линии.

На установке "Фотона-М" производятся изотопы Hg-196, Hg-198, Hg-202 с концентрациями свыше 98, 99 и 99% соответственно в количествах, достаточных для потребления в России и экспорта за рубеж.

Введение

На российском и мировом рынках имеется устойчивый спрос на изотопы ртути. Одним из методов получения изотопов ртути является фотохимический метод, который в последние годы развивался наиболее интенсивно. В России были созданы технологии и автоматические установки [1], предназначенные для получения изотопов ртути в значительных количествах. Наибольшее внимание в то время было уделено работам, направленным на разработку технологии получения наиболее редкого и дорогостоящего изотопа ртути Hg-196. Интерес к этому изотопу первоначально был связан с использованием его в медицине для диагностики некоторых заболеваний [2], а затем для изучения возможности применения ртути, обогащенной до 2–4% изотопом Hg-196 в источниках света для повышения их светоотдачи [3].

Дальнейшее развитие фотохимический метод получил при разработке технологии обогащения ртути изотопом Hg-202 до концентрации 99,8% [4]. Разработанные методы и техника позволяют получать не только изотоп Hg-202 с указанной концентрацией, но и изотопы Hg-196 и Hg-200 столь же высокого обогащения. В этих экспериментах была использована фотохимическая установка "Фотон-М" [5], созданная на базе ранее описанной установки "Фотон".

В некоторых предшествующих работах было показано, что фотохимический метод получения изотопа Hg-196 оказался более экономичным, чем электромагнитный [1]. Впервые ртуть, обогащенная изотопом Hg-196, была получена французскими исследователями в 1968 г. [6]. Созданная ими разделительная экспериментальная установка позволяла получать обогащенный по изотопу Hg-196 продукт с производительностью около 1 mg/d. В этих работах были измерены некоторые основные константы, характеризующие этот процесс. Несколько позже были опубликованы работы немецких ученых, в которых также изучались некоторые аспекты получения изотопа Hg-196 с использованием фотохимической реакции окисления ртути в присутствии бутадиена-1.3 [7,8]. В качестве

источника света в этих экспериментах была использована лампа низкого давления, наполненная ртутью, обогащенной по изотопу Hg-198.

Американские исследователи пошли по пути изучения фотохимической реакции возбужденных атомов ртути с хлористым водородом [9]. Реакция с HCl обладает существенно большим квантовым выходом по сравнению с реакцией окисления, но меньшим коэффициентом обогащения.

В России в течение ряда лет разрабатываются технологии получения изотопов ртути фотохимическим методом. Основой процесса, применяемого в этих экспериментах, является фотохимическая реакция возбужденных атомов ртути с кислородом в присутствии бутадиена-1.3. Атомы ртути возбуждаются резонансным излучением лампы низкого давления с $\lambda = 253.7$ nm. Эта реакция обладает максимальной селективностью процесса разделения, что особенно важно при обогащении изотопов ртути с перекрывающимися контурами линии 253.7 nm. Кроме того, использование ряда физических и технологических решений позволяет автоматизировать процесс обогащения, вести его круглосуточно с минимальным привлечением обслуживающего персонала [10].

Возможности получения изотопов ртути фотохимическим методом

Изотопическая сверхтонкая структура резонансной линии ртути 253.7 nm показана на рис. 1. Видно, что при реальных условиях ведения процесса обогащения, возбуждая атомы ртути даже достаточно узкой линией излучения, можно выделить из смеси изотопов лишь изотопы Hg-202, Hg-200, Hg-196. Остальные изотопы будут возбуждаться и, следовательно, выделяться группами: Hg-199, Hg-201 и Hg-204; Hg-198 и Hg-201; Hg-199 и Hg-201.

Линия излучения ртутной лампы, используемой для возбуждения атомов ртути, тоже не является монохроматической. Даже если для наполнения лампы взята ртуть,

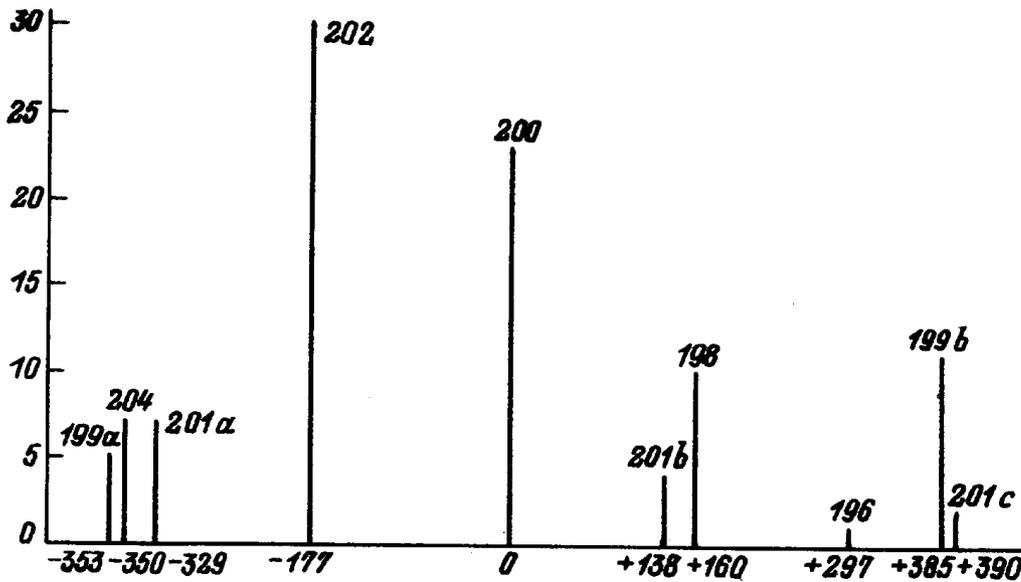


Рис. 1. Сверхтонкая структура резонансной линии ртути 253.7 нм.

обогащенная по целевому изотопу до 99.8%, то вследствие нелинейности светоотдачи несколько процентов ее излучения приходится на другие изотопы. Взаимное перекрытие контуров линий излучения лампы и контуров линий поглощения атомов ртути в реакционной ячейке приводит к тому, что оптическая селективность процесса оказывается ограниченной.

Взаимное перекрытие контуров резонансных линий, соответствующих изотопам Hg-198, Hg-199, Hg-201 и Hg-204, делает метод прямого возбуждения целевых изотопов излучением монохроматического источника света недостаточным для обогащения их до высоких концентраций. Однако это не означает, что выделение изотопов с перекрывающимися спектрами фотохимическим методом невозможно. Существуют приемы, проверенные на практике, позволяющие выделять фотохимическим методом все изотопы ртути. К таким приемам прежде всего следует отнести фильтрацию излучения источника света с целью подавления излучения, снижающего селективность процесса. Выбрав оптимальными изотопный состав ртути, помещенной в фильтр, вид буферного газа и газа-тушителя, их давление, температуру холодной точки фильтра, можно существенно повысить селективность фотохимической реакции.

Получение высокообогащенных изотопов ртути затруднено, а часто и невозможно, без применения "негативного" обогащения. В отличие от прямого, или "позитивного", обогащения, когда излучением источника света возбуждаются и выделяются целевые изотопы, при обратном, или "негативном", обогащении возбуждаются и вступают в фотохимическую реакцию примесные изотопы, причем в этом случае ценным продуктом является не только обогащенная целевым изото-

пом ртуть, но часто и ртуть, обогащенная примесными изотопами.

Для выделения всех изотопов ртути может быть предложено по крайней мере две схемы. При реализации первой схемы [11] ртуть смешанного изотопного состава облучается светом ртутной лампы, содержащей изотоп Hg-199, изотоп Hg-204 или их смесь. При этом возбуждаются и вступают в фотохимическую реакцию изотопы Hg-199, Hg-201 и Hg-204. Облучая светом лампы, содержащей изотоп Hg-198, эту смесь изотопов можно извлечь из нее изотоп Hg-201. Смесь изотопов Hg-199 и Hg-204 разделяется с помощью лампы, наполненной изотопом Hg-196 или Hg-204. Из ртути, обедненной изотопом Hg-199, Hg-201 и Hg-204, легко извлекаются изотопы Hg-198, Hg-200 и Hg-202, с помощью использования соответствующих источников света.

Разделение изотопов ртути по второй схеме [12] осуществляется в несколько этапов. На первом этапе ртуть произвольного состава облучается светом лампы, содержащей изотоп Hg-198, и разделяется на смесь, обогащенную изотопами Hg-198 и Hg-201, и смесь, обедненную этими изотопами. Изотопы Hg-198 и Hg-201 разделяются с помощью лампы, наполненной изотопом Hg-199, или Hg-204, или их смесью. Используя тот же источник света, из ртути, обедненной изотопом Hg-198 и Hg-201, извлекают смесь изотопов Hg-199 и Hg-204. Изотопы Hg-199 и Hg-204 можно разделить, используя источник света, содержащий изотоп Hg-204, либо источник света, содержащий изотоп Hg-196.

Разделение всех изотопов ртути с приемлемыми экономическими показателями стало возможным после существенной модернизации разделительной установки и изменения технологического цикла ее работы.

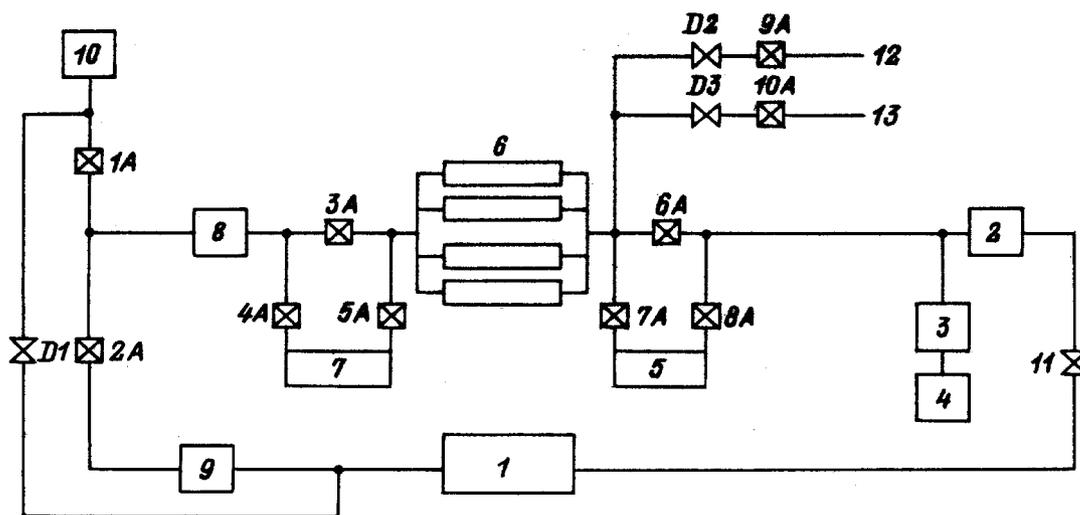


Рис. 2. Технологическая схема установки "Фотон-М". 1 — компрессор, 2 — измеритель расхода реагентов, 3 — газовый редуктор, 4 — баллон с реагентами, 5 — испаритель ртути, 6 — реакционные ячейки, 7 — сборник изотопов, 8 — измеритель плотности ртутного пара, 9 — ловушка ртутного пара, 10 — форвакуумный насос, 1A–10A — автоматические управляемые вентили, D1–D3 — вентили тонкой регулировки потока, 11 — ручной вентиль, 12 — водород, 13 — кислород.

Универсальная автоматическая установка "Фотон-М" и технологический цикл ее работы

Технологическая схема установки "Фотон-М" показана на рис. 2.

Для получения высокообогащенных изотопов ртути и, тем более, изотопов с перекрывающимися контурами резонансной линии, необходимо, чтобы на разделительной установке эффективно могли быть осуществлены прямое обогащение изотопа или группы изотопов, негативное обогащение, комбинация этих приемов, глубокое, до долей процента, обеднение смеси одним или несколькими изотопами, возможность использования, при необходимости, фильтрации излучения лампы.

Технологический цикл работы установки образован шестью режимами, которые следуют один за другим. В первом режиме циркуляционный контур установки через газовый редуктор 3 заполняется смесью реагентов, поступающей из баллона 4. Одновременно включаются ртутные лампы, компрессор 1 и нагреватель малоинерционного испарителя 5. По достижении заданной плотности атомов ртути в реакционных ячейках 6, регистрируемой измерителем плотности 8, установка переключается в режим накопления обогащенной окиси ртути на внутренних поверхностях реакционных ячеек. Для выполнения конкретных задач ячейки могут включаться параллельно, последовательно или комбинированно. Обедненная по целевым изотопам ртуть собирается в ловушку ртутного пара 9, охлаждаемой до -50 – -70°C .

По окончании этого режима выключается нагреватель испарителя 5 и плотность атомов ртути в течение нескольких минут снижается более чем на порядок. С

введением этого режима в технологический цикл работы установки удалось существенно снизить потери используемого сырья, часто весьма ценного.

В следующем режиме выключаются ртутные лампы и компрессор, часть циркуляционного контура и реакционные ячейки потоком водорода очищаются от реагентов и остаточных паров ртути. Осевшая в реакционных ячейках окись ртути, обогащенная целевым изотопом, восстанавливается до металла в атмосфере водорода при возбуждении в ячейках высокочастотного тлеющего разряда (этот процесс описан в [10]).

В последнем режиме технологического цикла внутренние поверхности реакционных ячеек очищаются от образовавшихся полимеров (производных бутадиена-1.3) в потоке кислорода при возбуждении ВЧ разряда. После окончания этого режима начинается новый рабочий цикл.

Технологические возможности установки, продемонстрированные ранее при получении высокообогащенных изотопов Hg-196 и Hg-202 и показанные в настоящей работе при выделении изотопа Hg-198, вселяют уверенность в получении и других изотопов ртути.

Выделение из природной смеси изотопа ртути Hg-198

Выделение изотопа Hg-198 фотохимическим методом затруднено, поскольку контуры линий поглощения изотопа Hg-198 и одной из компонент изотопа Hg-201 на сверхтонкой структуре резонансной линии 253.7 нм в реальных условиях ведения процесса обогащения полностью перекрываются. Тем не менее получение высококонцентрированного изотопа Hg-198 из произвольной смеси изотопов ртути возможно по двум схемам. Первая

схема предполагает ведение процесса обогащения в две стадии. На первой стадии ртуть сложного изотопного состава, например природного, облучается светом лампы, наполненной ртутью, обогащенной изотопом Hg-198, и извлекается ртуть, обогащенная изотопами Hg-198 и Hg-201. На этой стадии ценными продуктами являются как обогащенная ртуть, так и обедненная изотопами Hg-198 и Hg-201, которая может быть использована как сырье для получения других изотопов ртути, а также для наполнения ламп, предназначенных для применения на второй стадии обогащения.

На второй стадии ртуть, обогащенная изотопами Hg-198 и Hg-201, облучается светом лампы, наполненной ртутью, обедненной по этим изотопам. На этой стадии из смеси изотопов Hg-198 и Hg-201 извлекаются изотоп Hg-201 и другие примесные изотопы. Отвальный продукт, обогащенный изотопом Hg-198, собирается в ловушке.

Ведение процесса обогащения по этой схеме позволяет, кроме изотопа Hg-198, выделять и изотоп Hg-201, а также получать ртуть, обедненную по этим изотопам, являющуюся ценным сырьем для получения и других изотопов ртути.

Вторая схема — одностадийная является наиболее простой при выделении изотопа Hg-198 из природной смеси. Пары природной ртути облучаются светом лампы, наполненной ртутью, обедненной по изотопам Hg-198 и Hg-201. При этом возбуждаются и вступают в фотохимическую реакцию окисления все изотопы, кроме изотопа Hg-198, который собирается в ловушке. Используя несколько циклов обогащения, можно получить значительные количества высокообогащенного изотопа Hg-198 с относительно низкой себестоимостью. Высокая эффективность получения изотопа Hg-198 по этой схеме может быть объяснена повышением эффективности процесса в каждом последующем цикле по сравнению с предыдущим. Кроме того, с ростом номера цикла растет производительность и снижаются потери целевого изотопа.

Прямое обогащение ртути изотопами 198 и 201

Метод прямого обогащения изотопов ртути достаточно хорошо изучен и до сих пор использовался при получении изотопов Hg-196 и Hg-202. Однако обогащение ртути изотопами Hg-198 и Hg-201 в связи с перекрытием их линий поглощения имеет свои технологические особенности и закономерности.

В экспериментах по прямому обогащению ртути изотопами Hg-198 и Hg-201 была использована лампа, наполненная ртутью, обогащенной изотопом Hg-198 до концентрации 97.7%. Колба лампы изготовлена из трубы химически чистого прозрачного кварца с внутренним диаметром 14 mm. На колбу по всей длине напаяна рубашка водяного охлаждения, также изготовленная из

кварцевого стекла. К концам колбы припаяны токовводы, на внутренних концах которых смонтированы оксидные катоды. Режим работы лампы был оптимизирован по основным параметрам процесса обогащения — производительности и концентрации целевых изотопов в полученном продукте. Температура рубашки охлаждения лампы поддерживалась равной 22–24°C, электрическая мощность, потребляемая лампой, составляла около 100 Вт.

В первом цикле обогащения в качестве сырья была взята ртуть природного изотопного состава. В этом цикле, а тем более в последующих все эксперименты по выделению изотопов Hg-198 и Hg-201 велись с максимально возможной степенью извлечения β целевых изотопов из сырья. Под степенью извлечения целевого изотопа из используемого сырья понимается величина, равная отношению производительности установки по этому изотопу к подаче его в реакционную ячейку за то же время.

Из опыта получения изотопов Hg-196 и Hg-202 методом прямого обогащения известно, что с каждым последующим циклом, т. е. с ростом начальной концентрации целевых изотопов в сырье, падает коэффициент разделения α . Коэффициент разделения α — есть величина, определяемая выражением

$$\alpha = \frac{C_k(1 - C_0)}{(1 - C_k)C_0},$$

где C_0 — начальная концентрация целевого изотопа, выраженная в долях; C_k — конечная концентрация целевого изотопа, выраженная в долях.

Циклирование процесса обогащения ртути целевыми изотопами применяют для повышения их концентраций в полученном продукте. Однако на каждом цикле обогащения наблюдаются весьма ощутимые потери целевых изотопов, достигающие до 25%. В проведенных экспериментах по повышению концентрации целевых изотопов в конечном продукте потери на каждом цикле обогащения не превышает 20%.

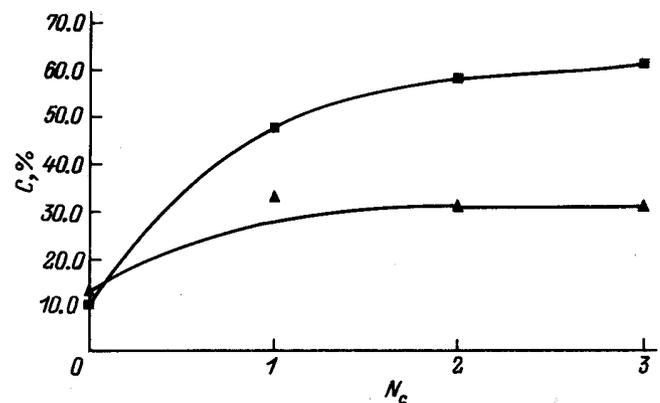


Рис. 3. Зависимость концентрации изотопа от количества циклов обогащения. ■ Hg-198, ▲ Hg-201; C — концентрация изотопов, N_c — номер цикла.

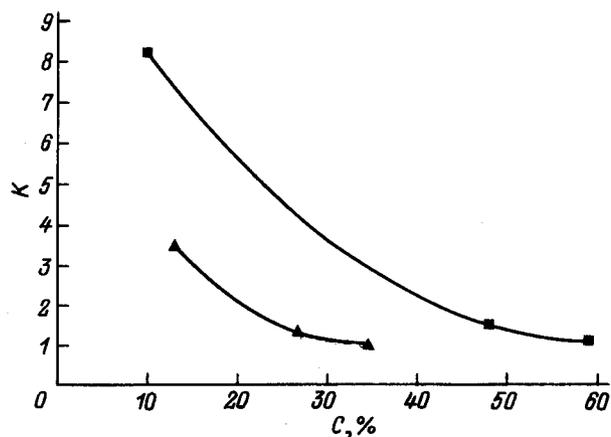


Рис. 4. Зависимость коэффициента разделения K от начальной концентрации изотопа. ■ Hg-198, ▲ Hg-201.

По результатам экспериментов по прямому обогащению ртути изотопами Hg-198 и Hg-201 построены зависимости концентраций этих изотопов от номера цикла обогащения (рис. 3) и коэффициентов разделения a по изотопам Hg-198 и Hg-201 от этих концентраций в сырье C_0 (рис. 4).

Анализ полученных данных показал, что если проведение первого и второго циклов обогащения можно считать оправданным, то проведение третьего и последующих циклов не ведет к заметному увеличению концентраций изотопов Hg-198 и Hg-201, поэтому с учетом потерь является экономически нецелесообразным.

Концентрацию изотопов Hg-198 и Hg-201 можно повысить, используя в прямом обогащении лампу, наполненную ртутью с суммарной концентрацией изотопов Hg-198, Hg-201 и Hg-204 не более 0.3–0.4%, либо используя оптический фильтр, содержащий ртуть, обедненную по изотопу Hg-198 и Hg-201.

Получение ртути, обедненной по изотопам Hg-198 и Hg-201

Для разделения смеси изотопов Hg-198 и Hg-201, полученной методом прямого обогащения, должен использоваться источник света, содержащий ртуть, обедненную по этим изотопам. Эффективность процесса разделения в значительной степени определяется отношением доли света, испускаемого примесными изотопами, к доле света в линии поглощения изотопа Hg-198. Технология выделения изотопа Hg-198 может считаться эффективной тогда, когда извлечение примесных изотопов из сырья существенно превышает извлечение изотопа Hg-198. Поэтому получение ртути, обедненной по изотопам Hg-198 и Hg-201 до долей процента, было выделено в отдельную задачу.

На рис. 5 показаны зависимости концентраций изотопов Hg-198 и Hg-201 в обедненной ртути от номера цикла N_c . Установлено, что скорость убывания из сырья

изотопа Hg-198 превышает скорость убывания изотопа Hg-201. Наиболее вероятной причиной этого явления является неполное совпадение контуров линий испускания лампы и поглощения компоненты изотопа Hg-201, т.е. центр линии поглощения компоненты изотопа Hg-201 облучается крылом линии испускания лампы.

Зависимость производительности установки от номера цикла показана на рис. 6.

Снижение концентрации изотопов Hg-198 и Hg-201 на каждом цикле позволяет вести процесс обеднения с нарастающей скоростью испарения сырья, а следовательно, и производительности установки. Полученные данные позволяют прогнозировать параметры процесса получения ртути, обедненной по изотопам Hg-198 и Hg-201, которая, кроме применения в источниках света и оптических фильтрах, предназначенных для выделения изотопа Hg-198, может быть использована как ценное сырье для получения изотопов Hg-199 и Hg-204 фотохимическим методом.

В этом эксперименте была получена ртуть с содержанием изотопов Hg-198 и Hg-201 менее 0.05 и 0.15%

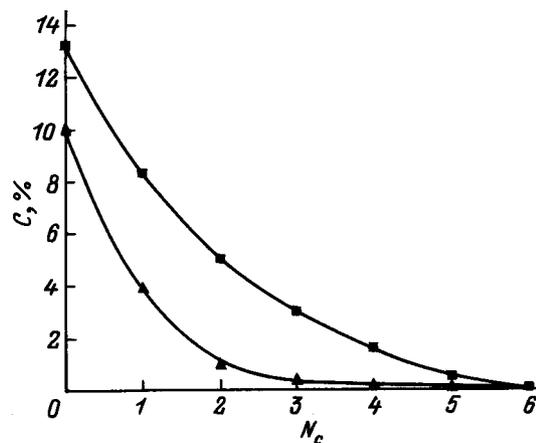


Рис. 5. Зависимость концентрации C изотопа от количества циклов (N_c — номер цикла). ▲ Hg-198, ■ Hg-201.

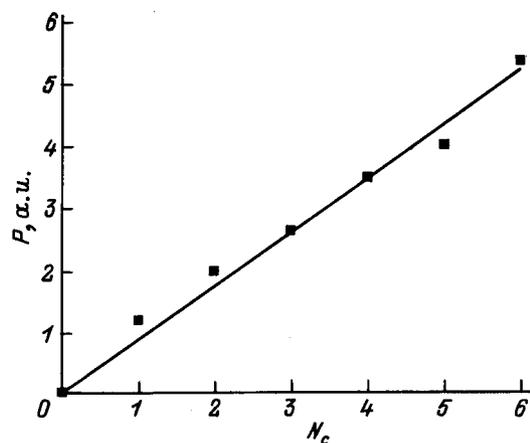


Рис. 6. Зависимость производительности установки P от количества циклов.

соответственно. Лампа, наполненная этой ртутью, была использована при проведении экспериментов по негативному обогащению ртути изотопом Hg-198.

Разделение смеси изотопов Hg-198 и Hg-201

Высокая концентрация примесных изотопов (Hg-199, Hg-200, Hg-202 и Hg-204) в полученном прямом обогащении продукте делает весьма затруднительным получение из него изотопа Hg-201 высокого обогащения. Поэтому на второй стадии был выделен лишь изотоп Hg-198 высокого обогащения. В качестве исходного сырья на второй стадии была взята ртуть, изотопный состав которой представлен в табл. 1.

Сырье облучалось светом лампы, наполненной ртутью, обедненной по изотопам Hg-198 и Hg-201.

На этой стадии светом ртутной лампы возбуждаются и вступают в фотохимическую реакцию окисления все изотопы, кроме изотопа Hg-198.

На рис. 7 показана динамика убывания концентрации примесных изотопов (C) в зависимости от номера цикла N_c .

Высокая концентрация изотопа Hg-201 в сырье относительно других примесных изотопов, накладывает ограничения на выбор таких параметров процесса, как плотность атомов ртути в реакционной ячейке. Такое ограничение обусловлено условием максимального извлечения примесных изотопов из сырья в каждом цикле.

Анализ полученных данных показывает, что скорости извлечения примесных изотопов различны и в основном определяются интенсивностью источника света. Относительно малая скорость извлечения изотопов Hg-199 и Hg-204 обусловлена недостаточно высокой концен-

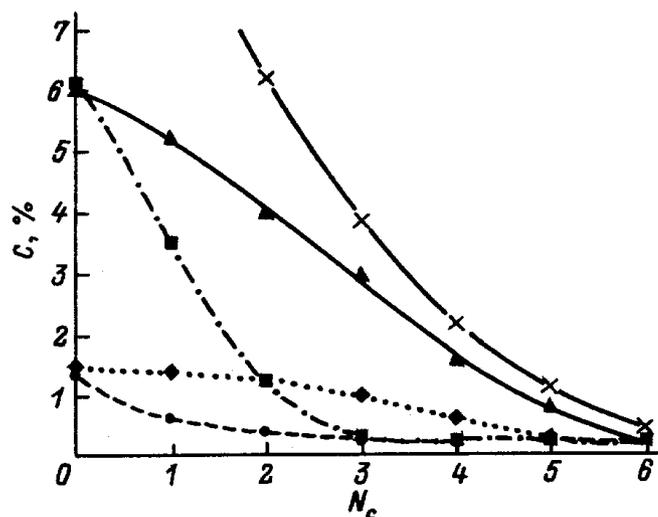


Рис. 7. Зависимость концентрации примесных изотопов C от числа циклов (N_c — номер цикла). ▲ Hg-199, ■ Hg-200, × Hg-201, ● Hg-202, ◆ Hg-204.

Таблица 1.

| Изотоп | Концентрация, % |
|--------|-----------------|
| 196 | 0.2 |
| 198 | 48.1 |
| 199 | 6.0 |
| 200 | 6.1 |
| 201 | 36.7 |
| 202 | 1.4 |
| 204 | 1.5 |

Таблица 2.

| Изотоп | Концентрация, % |
|--------|-----------------|
| 196 | 0.2 |
| 198 | < 0.05 |
| 199 | 42.0 |
| 200 | 20.00 |
| 201 | < 0.15 |
| 202 | 18.0 |
| 204 | 19.6 |

трацией этих изотопов в ртути, взятой для наполнения источника света.

Производительность установки на этой стадии получения изотопа Hg-198 может быть увеличена после оптимизации изотопного состава ртути, предназначенной для изготовления источника света. Очевидно, что для выравнивая скоростей извлечения примесных изотопов из сырья следует увеличить концентрацию в лампе изотопов Hg-199 и Hg-204 за счет снижения концентрации изотопов Hg-200 и в основном Hg-202. Примерный изотопный состав такой смеси представлен в табл. 2. Получение ртути, предназначенной для использования в источнике света, применяемом для обогащения изотопом Hg-198 продукта первой стадии, не представляется чрезмерно сложным. Используя лампу, наполненную ртутью, содержащей изотопы Hg-200 и Hg-202, можно в один цикл ртуть, обедненную по изотопам Hg-200 и Hg-202, с извлечением из сырья 65 и 80% этих изотопов соответственно.

Получение изотопа Hg-198 по одностадийной схеме

Одностадийная схема получения изотопа Hg-198 также является весьма перспективной, позволяющей получать как высокообогащенный изотоп Hg-198, так и смесь изотопов, обедненную по изотопу Hg-198, которая в дальнейшем может быть использована для получения ртути, обогащенной по изотопу Hg-201.

В одностадийной схеме смесь изотопов ртути произвольного изотопного состава, например природного,

облучается светом ртутной лампы, содержащей ртуть, обедненную по изотопам Hg-198 и Hg-201. При этом возбуждаются и вступают в фотохимическую реакцию окисления все изотопы, кроме изотопа Hg-198. В экспериментах по получению изотопа Hg-198 по этой схеме была использована ртутная лампа, наполненная ртутью, изотопный состав которой представлен в табл. 3.

Поскольку линии поглощения и испускания изотопов Hg-199, Hg-201 и Hg-204 в сверхтонкой структуре резонансной линии 253.7 нм перекрываются, то излучением компонент изотопов Hg-199 и Hg-204 будут возбуждаться и переводиться в оксид не только эти изотопы, но и изотоп Hg-201. Наряду с вышеназванными изотопами излучением лампы возбуждаются и изотопы Hg-200 и Hg-202, причем возбуждение этих изотопов должно осуществляться значительно эффективнее, чем остальных из-за высокого их содержания в лампе.

Одним из основных условий высокой эффективности процесса обогащения является глубокое извлечение примесных изотопов из сырья на каждом этапе. Для этого следует прежде всего оптимизировать режим работы лампы. Ширина линий излучения лампы должна быть достаточной для возбуждения двух компонент линии изотопа Hg-201, одна из которых, наиболее интенсивная, удалена от линии излучения изотопа Hg-204 на 0.03 см^{-1} , а другая, самая слабая, удалена от одной из компонент линии излучения изотопа Hg-199 на 0.011 см^{-1} .

Экспериментально было установлено, что оптимальным является режим, при котором температура лампы составляет 28°C , электрическая мощность, потребляемая лампой около 110 W. Графики скорости убывания примесных изотопов (C) в зависимости от номера цикла показаны на рис. 8.

Таблица 3.

| Изотоп | Концентрация, % |
|--------|-----------------|
| 196 | 0.11 |
| 198 | 0.05 |
| 199 | 21.33 |
| 200 | 26.87 |
| 201 | 0.15 |
| 202 | 41.93 |
| 204 | 9.58 |

Таблица 4.

| Изотоп | Концентрация, % |
|--------|-----------------|
| 196 | 0.3 |
| 198 | 0.1 |
| 199 | 42.1 |
| 200 | 15.1 |
| 201 | 0.3 |
| 202 | 23.7 |
| 204 | 18.4 |

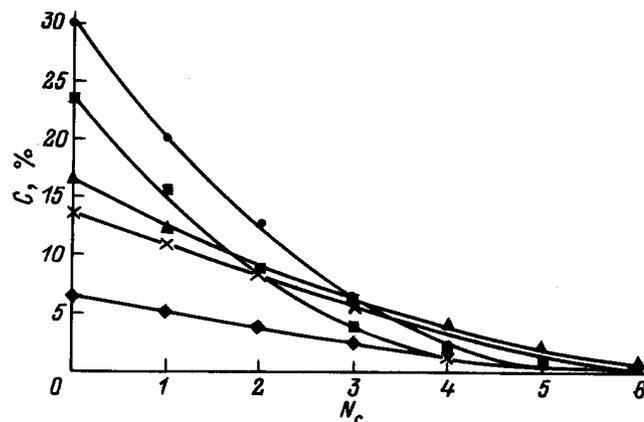


Рис. 8. Зависимость концентрации примесных изотопов C от количества циклов (N_c — номер цикла). ▲ Hg-199, ■ Hg-200, × Hg-201, ● Hg-202, ◆ Hg-204.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что скорости убывания концентраций изотопов Hg-200, Hg-202 в обогащенном продукте значительно превосходят скорости убывания концентраций изотопов Hg-199, Hg-204 и особенно Hg-201. Очевидно, что, выровняв скорости извлечения примесных изотопов, удастся сократить количество циклов обогащения и повысить концентрацию изотопа Hg-198 в конечном продукте. Наиболее сильное влияние на степень извлечения из сырья примесных изотопов оказывает соотношение их концентраций в лампе. Как было показано выше, ртуть, использованную для наполнения лампы, следует обеднить по изотопам Hg-200 и Hg-202.

Обеднение ртути с низким содержанием изотопов Hg-198 и Hg-201 по изотопам Hg-200 и Hg-202 было проведено в один цикл. Для этой цели была использована лампа, содержащая смесь изотопов Hg-200 и Hg-202. Изотопный состав ртути, полученной в результате этой работы, представлен в табл. 4.

Полученная ртуть была взята для наполнения лампы, предназначенной для проведения новой серии экспериментов по обогащению ртути изотопом Hg-198.

Как и ожидалось, использование лампы, содержащей ртуть с изотопным составом, близким к оптимальному, позволило получить ртуть, обогащенную по изотопу Hg-198 до 99.2% за 4 цикла обогащения.

Эффективность работы установки в режиме негативного обогащения может быть существенно повышена с использованием комбинированного включения разделительных ячеек, например все — последовательно, две — параллельно, а остальные — последовательно, и т. п.

Заключение

Создана автоматическая установка, предназначенная для получения фотохимическим методом высококонцентрированных изотопов, в том числе изотопов с перекры-

вающимися контурами резонансной линии. На установке впервые с высокой экономической эффективностью получены значительные количества, превышающие потребности России, изотопов Hg-196, Hg-202, Hg-198 с концентрацией выше 96, 99 и 99% соответственно.

Установка "Фотон-М" может быть использована для получения и других изотопов ртути с приемлемой экономикой.

Список литературы

- [1] Вязовецкий Ю.В., Сенченков А.П., Чувилин Ю.Ю. и др. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 8. С. 1643–1648.
- [2] Шлевков Б.А. // Мед. радиология. 1968. № 11. С. 36–41.
- [3] Maya J., Grossman M.W., Lagychenko R., Waymouth J.F. // Science. 1984. Vol. 226. P. 435–436.
- [4] Вязовецкий Ю.В., Сенченков А.П., Станков Н.Р. Патент России РФ № 1594749.
- [5] Вязовецкая Н.В., Вязовецкий Ю.В., Сенченков А.П., Станков Н.Р. Патент РФ № 1821994.
- [6] Morand J.P., Wacogne M., Poth E. // Energie Nucleaire. 1968. Vol. 10. N 6. P. 362–366.
- [7] Müller G. et al. // J. of Photochemistry. 1980. Vol. 13. N 2. P. 109–121.
- [8] Müller G. et al. // Isotopenpraxis. 1981. Vol. 17. N 5. P. 200–205.
- [9] Grossman M., Maya J. // 13th Intern. Quantum Electronics Conf. Anaheim (California), 1984.
- [10] Сенченков А.П., Болошин В.И. // А. С. СССР. № 714697.
- [11] Вязовецкий Ю.В. // Решение от 11.07.95 о выдаче патента по заявке № 93035083. 1993.
- [12] Вязовецкий Ю.В. // Решение от 11.07.95 о выдаче патента по заявке № 93035095.