

A mathematical model of microwave heat treatment process of moist materials

A. V. Markov

Saint-Petersburg Institute of Production Engineering (Technical university),
Saint-Petersburg, Russia

In regard to boring insect neutralization process in moist materials, acted with the help of microwave ray apparatus, there's considered a mathematical model. Model describes temperature and moisture distribution in single-layer and double-layer building materials with the internal heat source included. The equations and solutions to temperature and moisture distribution through material thickness for two stages of microwave heat treatment process are given: the first being marked as "phase transfer temperature is not achieved" and the second as "phase transfer temperature is still achieved". In addition, there're proposed the expressions to calculate the time-value up to that a given temperature at given material's depth is being achieved, i.e. the main parameter of boring insect neutralization process.

УДК 621.039.335

Получение изотопов ртути фотохимическим методом

Ю. В. Вязовецкий

Российский научный центр "Курчатовский институт", Москва, Россия

В РНЦ "Курчатовский институт" созданы экспериментальная установка и технологии, использующиеся для выделения высокообогащенных изотопов ртути фотохимическим методом с применением реакции окисления селективно возбужденных атомов ртути в присутствии бутадиена-1,3. В результате изучения влияния различных факторов, в том числе режимов работы источников света, на селективность процесса обогащения, на автоматической установке были получены изотопы Hg-196, Hg-198, Hg-199, Hg-200, Hg-202 различных концентраций.

На российском и мировом рынках имеется устойчивый спрос на изотопы ртути, интерес к которым первоначально был связан с использованием их в медицине для диагностики некоторых заболеваний, а затем — и для изучения возможности применения ртути, обогащенной до 2—4 % изотопом Hg-196 в источниках света для увеличения их светоотдачи [1]. В настоящее время значительно возросло потребление изотопов Hg-198, Hg-200, Hg-202, которые используются в ряде стран для изучения проблем, связанных с загрязнением экологических систем промышленными отходами ртути и ее соединениями [2, 3], а также в спектроскопии, геологии и т. п.

Разделение изотопов ртути может быть осуществлено различными методами, например, электромагнитным или центробежным. Однако в последние годы наиболее интенсивно развивались методы получения изотопов ртути, связанные с использованием фотохимических процессов, которыми принято называть процессы, основанные на химических реакциях возбужденных атомов. Фотохимическая технология по-

лучения изотопов ртути заняла особое место среди других технологий благодаря своей эффективности при получении значительных количеств изотопов средних концентраций, а также высокообогащенных изотопов.

Впервые ртуть, обогащенная изотопом Hg-196, была получена французскими исследователями в 1968 г. [4]. Созданная ими экспериментальная установка позволяла получать обогащенный до нескольких процентов изотоп Hg-196 с производительностью менее 0,1 мг/ч. В этих работах были измерены некоторые основные константы, характеризующие этот процесс. Позже были опубликованы работы немецких ученых, в которых также изучался процесс получения изотопа Hg-196 с использованием фотохимической реакции окисления ртути в присутствии бутадиена-1,3 C_4H_6 [5, 6]. Однако несмотря на значительные результаты, полученные в лабораторных условиях, можно назвать очень мало примеров успешного внедрения фотохимических процессов в промышленных масштабах. Одним из таких примеров является создание в РНЦ "Курчатовский институт" промышленной технологии

фотохимического разделения изотопов ртути. Это тот случай, когда научная идея была доведена до создания технологии и техники для выделения изотопов ртути. На экспериментальной установке в настоящее время производятся изотопы Hg-196, Hg-198, Hg-199, Hg-200, Hg-202 в количествах, достаточных для поставок на внутренний и мировой рынки.

Успех в этих работах был обусловлен, во-первых, наличием у ртути достаточно интенсивной резонансной линии с длиной волны $\lambda = 253,7$ нм и, во-вторых, благодаря использованию созданных интенсивных источников света с излучением в узких спектральных линиях, совпадающих с линиями поглощения атомов ртути, а также применением оригинальных физических, технических и технологических решений.

Основой процесса, используемого в этих работах, является фотохимическая реакция селективно возбужденных атомов ртути с кислородом в присутствии бутадиена-1,3. Эта реакция обладает максимальной селективностью процесса обогащения. Атомы ртути селективно возбуждаются резонансным излучением лампы низкого давления с $\lambda = 253,7$ нм и вступают в фотохимическую реакцию с кислородом в присутствии бутадиена-1,3. В результате реакции образуется нелетучая окись ртути, обогащенная целевым изотопом, оседающая на стенках фотохимической ячейки. Далее окись ртути восстанавливается с помощью высокочастотного разряда в атмосфере водорода и собирается в охлаждаемом сборнике изотопов.

Применение ряда физических и технических решений позволило автоматизировать процесс обогащения, вести его круглосуточно с минимальным привлечением обслуживающего персонала [7].

Таким образом, на установке одновременно осуществляется обогащение ртути целевым изотопом и обеднение отвала этим изотопом; и обогащенный и обедненные продукты являются ценным результатом работы установки.

Потенциальные возможности получения изотопов ртути фотохимическим методом

Если обратиться к рис. 1, где показана сверхтонкая структура резонансной линии ртути $\lambda = 253,7$ нм, нетрудно заметить, что изотопы Hg-196, Hg-200 и Hg-202 выделяются фотохимическим методом наиболее просто, поскольку их линии поглощения и испускания не перекрываются линиями других изотопов. Линии же поглощения изотопов Hg-198, Hg-199, Hg-201 и Hg-204 взаимно перекрываются, поэтому ранее считалось, что выделение их фотохимическим методом весьма затруднительно и экономически нецелесообразно. Однако в работах [8, 9] было показано, что, используя различные технологии фотохимического обогащения, можно выделить все изотопы ртути, а в работе [7] описана эффективная технология выделения изотопа Hg-198 из природной смеси. В реальных условиях ведения процесса обогащения, возбуждая атомы ртути даже достаточно узкой линией излучения, можно выделить из смеси изотопов 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 монохроматичной. Даже если для наполнения лампы взята ртуть, обогащенная по целевому изотопу до 99,6 %, 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.

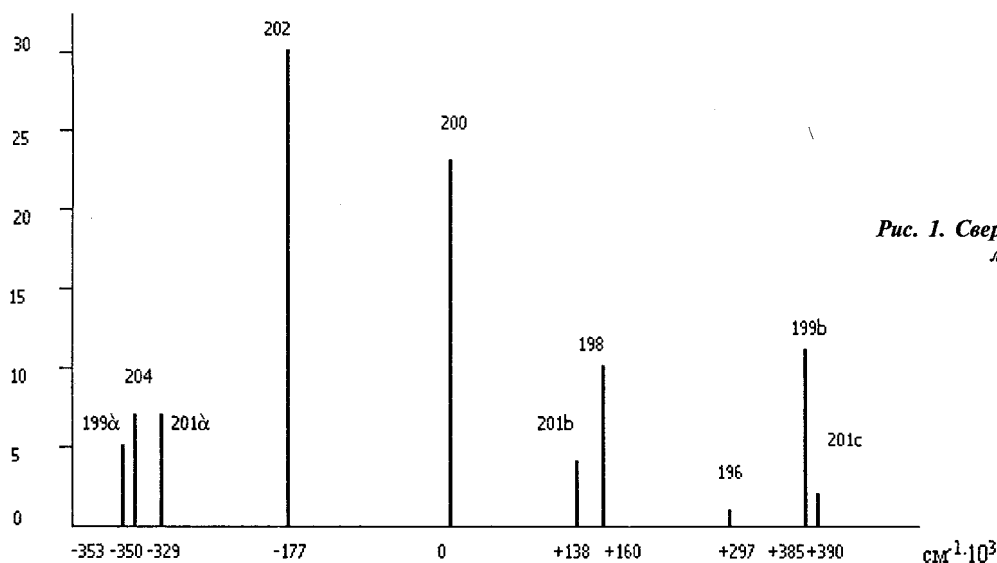


Рис. 1. Сверхтонкая структура резонансной линии ртути 253,7 нм

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 этих изотопов фотохимическим методом невозможно. Существуют приемы, использующиеся на практике, позволяющие выделять фотохимическим методом изотопы ртути с взаимно перекрытыми контурами резонансной линии. К таким приемам прежде всего следует отнести фильтрацию излучения источника света для подавления излучения, снижающего селективность процесса. Выбрав оптимальным изотопный состав ртути, помещенной в фильтр, вид буферного газа и газатушителя, 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 изотопом ртуть, но часто и ртуть, обогащенная примесными изотопами. Получение изотопов ртути с концентрацией, превышающей 95 %, стало возможно только благодаря применению негативного обогащения. Кроме того, практически всегда обогащение ртути происходит в несколько циклов, когда в качестве сырья на каждом последующем цикле используется обогащенный продукт, полученный на предыдущем.

Для выделения всех изотопов ртути было предложено две схемы [8, 9]. Частично эти схемы были реализованы при получении изотопов Hg-198 и Hg-199 на фотохимической установке.

Универсальная автоматическая установка для разделения изотопов ртути и технологический цикл ее работы

Для получения высокообогащенных изотопов ртути и тем более изотопов с перекрывающимися контурами резонансной линии необходимо, чтобы на разделительной установке эффективно могли быть осуществлены следующие реакции: 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.

Всем этим условиям удовлетворяет разработанная в РНЦ "Курчатовский институт" установка [7]. Эта установка состоит из двух основных частей: замкнутого прогреваемого циркуляционного контура, объединяющего основные узлы установки, и электротехнического блока, обеспечивающего электропитание узлов установки.

Процесс обогащения изотопов ртути на технологической установке протекает следующим образом. В замкнутом циркуляционном контуре прокачивается смесь кислорода и бутадиена-1,3 (далее — рабочая смесь). Пары ртути из испарителя потоком рабочей смеси выносятся в контур и поступают в разделительные ячейки, включенные параллельно, последовательно или комбинированно в зависимости от выбранного режима работы установки. В разделительных ячейках возбужденные излучением ртутных ламп с длиной волны $\lambda=253,7$ нм атомы ртути вступают в фотохимическую реакцию окисления и в виде окиси оседают на внутренней поверхности ячеек. Ртуть, обедненная целевым изотопом или группой изотопов, называемая отвалом, оседает в охлаждаемой ловушке. Периодически через разделительные узлы прокачивается водород, возбуждается высокочастотный разряд и окись ртути, обогащенная целевым изотопом, восстанавливается до металла. Способ восстановления обогащенной ртути из окиси описан в работе [10]. Металлическая ртуть в виде пара потоком водорода сносится в охлаждаемый сборник.

В соответствии с заданной программой установка автоматически переходит от одного режима работы к другому. Необходимые режимы работы осуществляются с помощью элементов, которые управляются сигналами, генерируемыми в блоке автоматики.

Технологическая схема установки показана на рис. 2. Полный цикл работы установки образован шестью режимами, которые следуют один за другим. В первом режиме циркуляционный контур установки через газовый редуктор заполняется смесью реагентов, поступающей из баллона с реагентами. Одновременно включаются ртутные лампы, компрессор и нагреватель малоинерционного испарителя (ртути). По достижении заданной плотности атомов ртути в реакционных ячейках, регистрируемой измерителем плотности ртутного пара, 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 ловушке ртутного пара, охлаждаемой до $-50 \div -70$ °С.

Плотность ртутного пара в установке измеряется с помощью измерителя плотности ртутного пара. Рабочая смесь, содержащая пары ртути, прокачивается через регулируемый зазор между кварцевыми окнами, где плотность атомов ртути

измеряется по степени поглощения ими света резонансной линии $\lambda=253,7$ нм, испускаемого контрольной СВЧ-лампой. Для регистрации излучения, прошедшего через измеритель, использован фотоэлемент типа Ф-29 с теллуристорубидиевым фотокатодом.

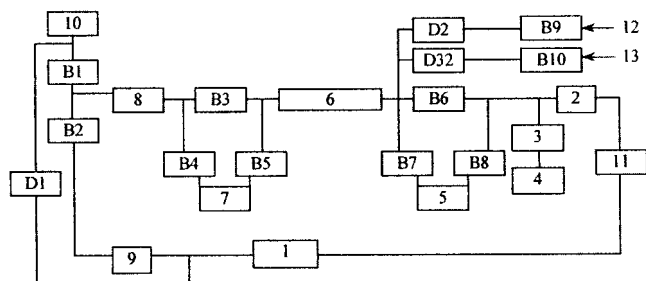


Рис. 2. Технологическая схема установки:

- 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; 11 — ручной вентиль;
12 и 13 — напуск кислорода и водорода;
B1—B10 — автоматические управляемые вентили;
D1—D3 — вентили тонкой регулировки потока

По окончании режима накопления обогащенной ртути выключается нагреватель испарителя ртути, 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.

На следующем этапе 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 и собирается в сборнике изотопов.

В последнем режиме технологического цикла внутренние поверхности реакционных ячеек очищаются от образовавшихся полимеров (производных бутадиена-1,3) в потоке кислорода при возбуждении высокочастотного разряда. После окончания этого режима начинается новый рабочий цикл.

Технологические возможности установки продемонстрированы при получении изотопов Hg-196, Hg-198, Hg-199, Hg-200 и Hg-202 различных концентраций.

Разделительный фотохимический узел

Успешная работа установки в значительной степени определяется конструкцией разделительного узла, содержащего фотохимическую ячейку, ртутную лампу низкого давления с на-

паянной на нее водяной рубашкой и при необходимости изотопный фильтр (рис. 3).

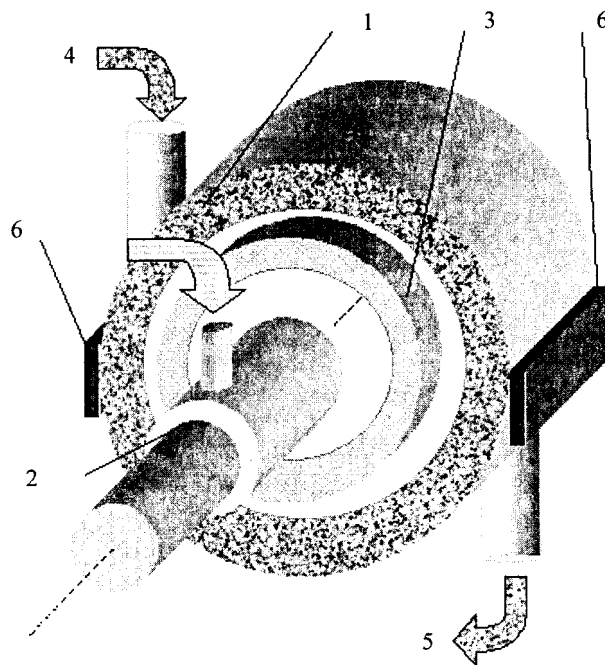


Рис. 3. Фотохимический разделительный узел:

- 1 — фотохимическая ячейка; 2 — ртутная лампа низкого давления; 3 — изотопный фильтр; 4 — входной патрубок; 5 — выходной патрубок; 6 — электроды

Простейшая фотохимическая ячейка представляет собой двустенный объем, образованный двумя кварцевыми трубами, спаянными на концах или уплотненными по торцам специальными фланцами. Ячейка снабжена входным патрубком, служащим для подачи реагентов — ртути, кислорода, бутадиена-1,3, и выходным патрубком для отвода обогащенной ртути и продуктов фотохимической реакции.

На внешней трубе реакционной ячейки, снаружи, напротив друг друга, размещены два электрода, выполненные из никелевой фольги. Один из электродов заземлен, а на другой (в режиме снятия наработки и чистки ячеек от органических отложений в атмосфере кислорода) подается переменное напряжение частотой 50—60 кГц и амплитудой 6—10 кВ, создающее во внутреннем объеме ячейки равномерный высокочастотный разряд.

Стабильное производство изотопов ртути фотохимическим способом возможно при наличии долговечных электродных ртутных ламп.

Разработанные конструкция и технология изготовления ртутных ламп гарантируют их использование в течение не менее 10 тыс. ч. Колба лампы изготавливается из трубы химически чистого прозрачного кварца диаметром 16—18 мм. Для изготовления лампы используется кварцевое стекло, не поглощающее резонансную линию 253,7 нм, например, типов КУ-1, КУВИ-1, КУВИ-2 и т.п. На рабочую часть колбы напаяна рубашка водяного охлаждения со штуцерами для подачи и отвода воды. К концам колбы припая-

ны катодные части, изготовленные из заготовок галогенных ламп, на электрические выводы которых установлены травессы с приваренными к ним оксидными катодами и газопоглотителями типа ТНЭ-8Д, обеспечивающими чистоту буферного газа в лампе в течение всего периода ее эксплуатации. Лампа наполняется смесью неона и гелия до парциальных давлений 0,5 и 0,3 кПа, соответственно. В лампу помещается примерно 10–15 мг ртути, требуемого изотопного состава. Добавление в лампу гелия приводит, во-первых, к повышению напряжения горения, что при фиксированном токе через лампу увеличивает ее световой выход, и, во-вторых, понижает температуру плазмы в центре разряда, что делает более узкими линии излучения лампы.

Напряжение горения лампы длиной ~900 мм составляет 400–500 В при токе 0,25–0,35 А. В этом режиме лампа гарантированно работает в течение 10 тыс. ч.

Световой выход изготовленных таким образом ламп в линию 253,7 нм и форму самой линии рассчитать чрезвычайно сложно. В электрическом разряде, происходящем внутри лампы, протекает множество неравновесных процессов, полностью учесть которые при расчете практически невозможно. Световой выход лампы в линию 253,7 нм зависит от мощности, вложенной в лампу, от температуры ее стенки при фиксированном газонаполнении.

Плотность атомов ртути в реакционных ячейках установки контролируется измерителем плотности, содержащим безэлектродную ртутную лампу с ВЧ-возбуждением. Подобные источники света применяются также в аппаратуре атомно-резонансной спектрофотометрии, интерферометрах, газоанализаторах, стандартах частоты и т. п.

Технология изготовления высокочастотных безэлектродных ламп (ВБЛ), содержащих ртуть требуемого изотопного состава и газопоглотитель, была разработана в Институте молекулярной физики РНЦ "Курчатовский институт" и описана в работах [11, 12].

Стабильность излучения электродных ртутных ламп низкого давления, которые используются в разделительных узлах, является важнейшим параметром, влияющим на производительность установки, степень обогащения исходного сырья, потери ценного сырья и т. п.

Интенсивность светового потока вновь изготовленной электродной лампы низкого давления снижается в течение всего срока эксплуатации. Снижения интенсивности связано с адсорбцией атомов ртути на внутренних поверхностях кварцевой колбы и зависит от ее температуры, чем она ниже, тем быстрее ртуть адсорбируется на кварце. Кроме того, со стенкой колбы взаимодействуют ионы ртути, это ведет к потемнению внутренней поверхности лампы и к дополнительному снижению интенсивности, причем,

чем выше кинетическая энергия ионов ртути, тем быстрее темнеет стекло.

Частичное восстановление интенсивности источника света происходит при кратковременном повышении температуры стенки лампы до 80–90 °С, что обусловлено десорбцией ртути. Полное осветление колбы лампы и полное восстановление ее интенсивности излучения достигается кратковременным высокотемпературным отжигом (500–600 °С).

Следует особо отметить, что недостаточное количество ртути в лампе приводит к снижению интенсивности светового потока в линию 253,7 нм, практически до нуля. Минимальное количество ртути, необходимое для изготовления надежного источника, берется из расчета 0,1 мг на каждый 1 см³ объема лампы.

Оптимизация основных характеристик процесса разделения иллюстрируется на примере обогащения в первом цикле изотопа Hg-200. На рис. 4, а показаны зависимости производительности Р и концентрации С изотопа Hg-200 от температуры стенки лампы Т.

В работах, выполненных ранее, было установлено, что с уменьшением температуры лампы ее световой выход уменьшается. Вместе с тем снижение температуры лампы снижает степень самообращения линии излучения, что ведет к увеличению световой отдачи лампы в центре линии поглощения целевого изотопа. Эти факторы приводят к снижению производительности установки в первом случае и к ее увеличению — во втором. Это означает, что существует оптимальный с точки зрения производительности процесса обогащения тепловой режим работы лампы.

Как видно из рис. 4, а производительность установки по изотопу Hg-200 возрастает с ростом температуры лампы, так как с повышением температуры лампы растет ее светоотдача и, следовательно, производительность. Вместе с тем повышение температуры лампы приводит к уширению и частичному самообращению линии излучения. Вследствие этого снижается степень обогащения полученного продукта. В зависимости от поставленной цели устанавливается такой температурный режим работы лампы, который обеспечивает получение продукта заданной концентрации за счет некоторого снижения производительности.

Сделанные выводы подтверждаются и ходом кривых зависимости концентрации изотопа от температуры лампы. С ростом температуры лампы концентрация изотопа Hg-200 в конечном продукте падает. Следует подчеркнуть, что с ростом температуры лампы увеличиваются концентрации примесных изотопов в полученном продукте, что приводит к снижению селективности.

Другим важным параметром, характеризующим работу лампы, а, следовательно, и процесс обогащения ртути целевым изотопом, является ток, протекающий через лампу (см. рис. 4, б).

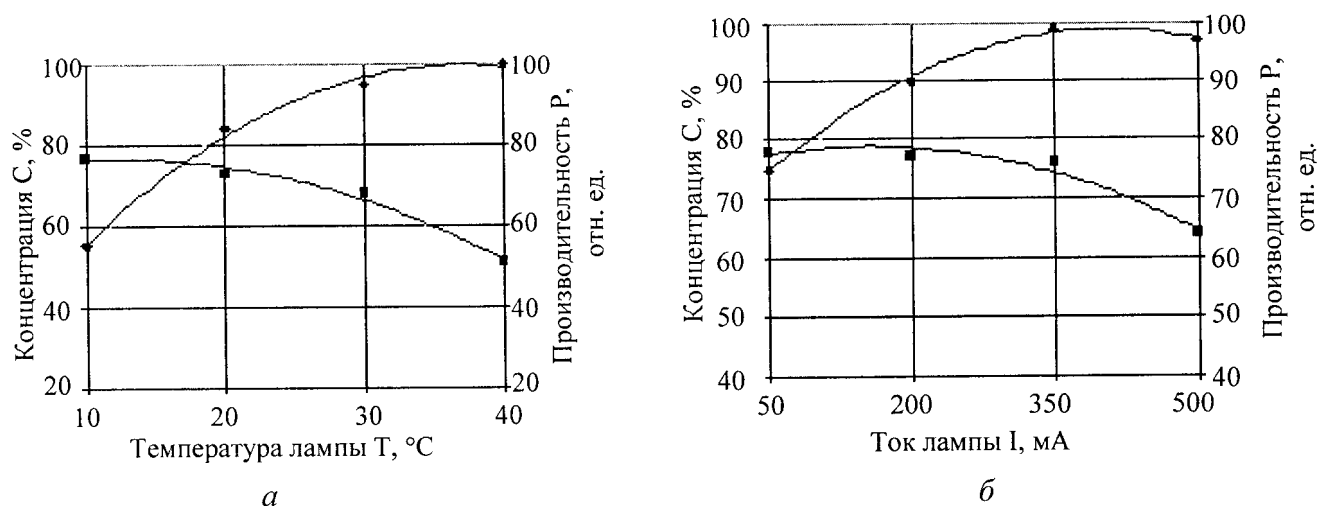


Рис. 4. Зависимость производительности P и концентрации изотопа C Hg-200: a — от температуры ртутной лампы T ; b — от тока ртутной лампы I

■ — концентрация, %; ♦ — производительность, отн. ед.

Обе кривые проходят через явно выраженный максимум, лежащий в интервале токов от 280 до 370 мА. Анализируя ход кривых, можно утверждать, что с ростом тока лампы растет ее световыдача, и, следовательно, производительность установки. Но с увеличением тока лампы растет радиальный градиент температур разрядного столба, что приводит к уширению ее линий излучения и возникновению "крыльев". Такая трансформация спектра излучения лампы приводит к снижению производительности по изотопу Hg-200 при относительно высоких плотностях тока лампы, в то время как интегральная производительность установки с ростом тока лампы растет. Снижение производительности по целевому изотопу и одновременное увеличение интегральной производительности приводит к заметному снижению концентрации целевого изотопа в полученном продукте.

Заключение

Успех в работах по фотохимическому разделению изотопов ртути был обусловлен, в частности, использованием специально созданных интенсивных источников света с излучением в изотопически узких спектральных компонентах резонансной линии $\lambda=253,7$ нм, а также применением оригинальных физических, технических и технологических решений при создании установки.

Используя фотохимическую реакцию ртути с кислородом в присутствии бутадиена-1,3 и изучив влияние различных факторов, прежде всего режимов работы источников света, на производительность и селективность процесса обогащения на автоматической установке, созданной в

РНЦ "Курчатовский институт", были получены следующие изотопы ртути: Hg-196 (2—97 %), Hg-198 (80—98 %), Hg-199 (80—90 %), Hg-200 (80—98,5 %), Hg-202 (80—99,5 %).

Фотохимический метод занял лидирующие позиции в многообразии технологий производства изотопов ртути благодаря своей эффективности при получении значительных количеств изотопов средних концентраций, а также высокообогащенных изотопов.

Литература

1. Maya J., Grossman M. W., Laguchenko R. et al. // Science. 1984. V. 226. P. 435.
2. <http://www.umanitoba.ca/institutes/fisheries/METAALI-CUSI.html> "Mercury Experiment to Assess Atmospheric Loading in Canada and United States".
3. http://sofia.usgs.gov/posters/merc_cycle/ "aquatic cycling of Mercury in the Everglades (ACME) Project: Synopsis of Phase I Studies and Plans for Phase II Studies".
4. Morand J. P., Wacogne M., Poth E. // Energie Nucleaire. 1968. V. 10. № 6. P. 362—366.
5. Muller G. et al. // J. of Photochemistry. 1980. V. 14. № 2. P. 109—121.
6. Grossman M., Maya J. Photochemical Enrichment of Hg-196. 13th International Quantum Electronics Conference. Anaheim. (California), 1984.
7. Viazovetski Y. V., Senchenkov A. P. // Journal of Technical physics. 1998. V. 68. № 1. P. 67.
8. Viazovetski Y. V. Patent 2074017 Russia. B 01 D 59/34. 1993.
9. Viazovetski Y. V. Patent 2074018 Russia. B 01 D 59/34. 1993.
10. Сенченков А. П., Болошин В. И. // Способ фотохимического разделения изотопов ртути. А. с. 714697 СССР. БИ № 38. 1982.
11. Вязовецкая Н. В., Вязовецкий Ю. В., Сенченков А. П., Станков Н. Р. // Высоочастотные безэлектродные источники света. Научные труды ЛГУ. Рига. 1992. Т. 573. С. 94—97.
12. Вязовецкая Н. В., Вязовецкий Ю. В., Иващенко В. И., Сенченков А. П. // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 02—03. С. 286—287.

Статья поступила в редакцию 11 июля 2004 г.

Mercury isotope production with the photochemical method

Yu. V. Vyazovetskiy

Russian Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

The RRC "Kurchatov Institute" has designed an experimental setup and developed procedures applicable for extraction of highly enriched mercury isotopes with a photochemical method which makes use of an oxidation reaction of selectively excited mercury atoms in the presence of butadiene-1.3. Having studied the effect of various factors including the influence of light source operation modes on the enrichment process selectivity on an automated plant, we have manufactured the following isotopes: Hg-196, Hg-198, Hg-199, Hg-200 and Hg-202 of various concentrations.

УДК 621.373

Генератор Маркса на кабельных линиях

Ю. Ф. Бондарь, Г. П. Мхеидзе

Институт общей физики РАН, Москва, Россия

Изготовлен четырехкаскадный кабельный генератор Маркса из двойных коаксиальных кабелей. Измерения показали, что коэффициент умножения напряжения в генераторе $k = U_{out}/U_0$ существенно меньше ожидаемого (в пределах 2—3 вместо $k \approx n = 4$), что объясняется наличием паразитных емкостей между каскадами генератора.

В качестве генераторов импульсного напряжения широко используются двойные формирующие линии (ДФЛ) различной конфигурации [1] и в различных сочетаниях [2].

На рис. 1 представлено несколько вариантов ДФЛ: плоская из двух полосковых линий, коаксиальная из двух коаксиальных линий и двойная коаксиальная внешняя и внутренняя линии.

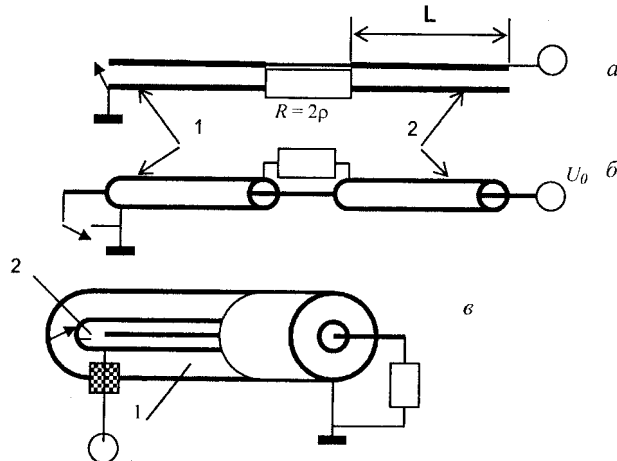


Рис. 1. Двойные формирующие линии:

- а — плоская (из двух полосковых линий 1 и 2);
 б — коаксиальная (из двух коаксиальных линий 1 и 2);
 в — двойная коаксиальная: внешняя 1 и внутренняя 2

ДФЛ просты в устройстве, совмещают функции накопителя энергии и формирователя им-

пульса и с высокой точностью обеспечивают импульсы прямоугольной формы.

Генерируемый ДФЛ импульс на согласованной нагрузке определяется как

$$R = 2\rho = 2 \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \ln \frac{D}{d},$$

где ρ — волновое сопротивление коаксиальной линии;

ϵ — диэлектрическая постоянная изолятора, заполняющего линии;

D и d — внешний и внутренний диаметры линий. Импульс имеет амплитуду $U_0 = U_{ch}$ (U_{ch} — зарядное напряжение), длительность импульса $\tau = 2L\sqrt{\epsilon}/c$ (L — длина линий, c — скорость света) и энергоемкость $W = U_0^2\tau/R$.

При создании импульсных генераторов в диапазоне напряжений 10—500 кВ по схеме ДФЛ целесообразно использовать промышленные кабели [3], характеристики некоторых из них даны в таблице.

№	Диапазон напряжений, кВ	Диаметр 2R, мм	Волновое сопротивление ρ , Ом
1	До 30	11	50
2	До 300	28	25
3	До 500	40	50
4	До 30	7	$\rho_1 = \rho_2 = 25$