

ОЦЕНКА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ УРАНА ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ

Райан Снайдер

АННОТАЦИЯ

Продолжительные усилия по разработке коммерчески жизнеспособного процесса обогащения урана на базе лазеров, поначалу атомного, а затем и молекулярного разделения изотопов, увенчались ограниченным успехом. В этой статье обсуждается модель третьего поколения технологии лазерного обогащения, в котором излучение лазера на углекислом газе в результате рамановского рассеяния образует фотоны с длиной волны 16 мкм, возбуждающие колебательные уровни молекул гексафторида урана-235 в адиабатически расширяющейся газовой струе свободных носителей, что позволяет осуществить частичное разделение изотопов урана посредством подавления конденсации. Одним из примеров такой методики разделения может быть процесс SILEX (Separation of Isotopes by Laser Excitation, или «Разделение изотопов лазерным возбуждением»), разрабатывавшийся как часть проекта «Глобальное лазерное обогащение». Представлена модель идеального асимметричного каскада для обогащения урана до уровня оружейного качества; в нее включен анализ минимальных эксплуатационных требований к лазеру. Обсуждаются рабочие параметры, физические пространственные ограничения и оценки энергетической эффективности. Представлена также оценка требующихся технических навыков. И, наконец, в материалах, представленных в сетевом приложении, обсуждаются лазеры, которые могут быть использованы в таком процессе, и предлагаются обсуждения образования димеров, каскада обогащения на базе лазеров, и модели оценки коэффициента обогащения.

Райан Снайдер работает по программе науки и всеобщей безопасности Принстонского университета, Принстон, Нью-Джерси, США.

Почтовый адрес для корреспонденций: Ryan Snyder, Program on Science and Global Security, Princeton University, 221 Nassau Street, Princeton, NJ 08542, USA.

Адрес электронной почты: rasnyder@princeton.edu

Статья получена 9 июня 2015 года и принята к публикации 11 марта 2016 года.

ВВЕДЕНИЕ

Поиск экономичного метода обогащения урана с использованием лазеров до сих пор был лишь ограниченно успешным. Были исследованы различные методики возбуждения атомных или молекулярных состояний урана наряду с разнообразными методами сбора обогащенного продукта, но ни одна из лазерных технологий не пока-

зала себя конкурентоспособной с технологией газовых центрифуг. Однако, разрабатываемые в настоящее время системы лазерного обогащения третьего поколения могут бросить вызов доминирующему положению газовых центрифуг на рынке обогащения урана, а их влияние на распространение ядерных вооружений до сих пор не было в должной степени оценено.

Один из рассматриваемых для коммерциализации процессов лазерного обогащения третьего поколения известен под названием «Разделение изотопов лазерным возбуждением» (SILEX – Separation of Isotopes by Laser Excitation)¹. Этот процесс был разработан в лабораторном масштабе австралийской компанией Silex Systems Ltd., и лицензия на него была передана для коммерческой разработки консорциуму «Глобальное лазерное обогащение – Global Laser Enrichment (GLE)» в составе компаний «Дженерал электрик» (51%), «Хитачи» (25%) и Камеко (24%). В 2012 году этот консорциум получил от Комиссии по ядерному регулированию (NRC) США лицензию на строительство и эксплуатацию завода лазерного обогащения на предприятии по изготовлению ядерного топлива компаний «Дженерал Электрик» и «Хитачи» в Уилмингтоне, штат Северная Каролина². Консорциум GLE заявлял, что решение о продвижении проекта будет зависеть от рыночных соображений, но компания Silex Systems Ltd. объявила о ключевых усовершенствованиях технологии, которые могут понизить капитальные и эксплуатационные затраты коммерческого производственного предприятия³. Другие страны, проводящие исследования в областях, относящихся к этой технологии⁴, также могут построить заводы, если они посчитают, что обогащение урана лазерами будет стоить меньше, чем его обогащение центрифугами.

Опасения о рисках распространения в отношении технологии SILEX были высказаны в обращении 2010 года в Комиссию по ядерному регулированию, в котором содержалась просьба включить в процесс лицензирования оценки рисков распространения⁵. Аналогичный запрос оценки рисков распространения содержался в письме 2012 года в Комиссию по ядерному регулированию от девятнадцати экспертов по ядерным проблемам⁶. Единственная оценка была проведена по внутреннему поручению компаний «Дженерал Электрик» и «Хитачи», но ее результаты никогда не были представлены в открытых публикациях. Сообщалось, что выводы оценки сводились к тому, что, хотя установка SILEX будет занимать меньше места и использовать меньшую мощность, чем сравнимый центрифужный завод, обогатительный завод будет проще обнаружить, и в любом случае лазерная технология будет находиться за пределами технических возможностей большинства возможных государственных распространителей⁷. В то время, как наиболее вероятным сигналом обнаружения, упоминаемым в этой оценке, являются рыночные указания по закупке относящегося к лазерам оборудования, не ясно, рассматривались ли в оценке все возможные лазерные системы, которые могли бы быть применены в технологии SILEX, поскольку идентификация всех таких лазеров и относящегося к ним оборудования может быть затруднена из-за другого коммерческого и исследовательского применения такого оборудования. Кроме того, не ясно, относится ли суждение о том, что лазерная технология не будет доступна большинству государств, ко всем возможным лазерным системам.

Цель этой статьи состоит в том, чтобы представить исходный анализ некоторых ключевых технических особенностей возможной системы лазерного обогащения урана третьего поколения и их отношения к распространению ядерного оружия. В первом разделе обсуждается, что известно сейчас о процессе SILEX, и о лазере, который мог бы быть использован в этом процессе. Затем эти сведения используются

для анализа минимальных требований к рабочим характеристикам лазера, применяемого для колебательного возбуждения соединений урана-235 в газе, протекающем через емкость низкого давления. Во втором разделе обсуждается метод разделения изотопов, известный, как подавление конденсации.

В третьем разделе статьи представлены возможные эксплуатационные параметры и оценки коэффициентов обогащения для системы лазерного обогащения третьего поколения, а также результаты моделирования идеального асимметричного каскада для производства существенного количества высокообогащенного урана (ВОУ), обогащенного изотопом урана-235 до 90 процентов (известного также как ВОУ оружейного качества), пригодного для изготовления ядерного оружия. Результаты этого анализа были использованы для оценки физической площади, необходимой для размещения предприятия лазерного обогащения для производства более, чем 30 кг ВОУ, обогащенного до 90%, в год, а минимальные требования к рабочим характеристикам лазера и другие потребности в электроэнергии были использованы для расчета энергопотребления на единицу производительности обогащения. Приводится сравнение с центрифужным предприятием аналогичного масштаба.

В сетевом приложении описываются некоторые лазерные технологии, которые могли бы оказаться пригодными для обогащения урана по методу подавления конденсации, а также некоторые другие их применения. В нем также приводятся дополнительные подробности по образованию димеров, модель коэффициента обогащения для системы лазерного обогащения третьего поколения, построенная по работам Дж. Еркенса, и модель идеального асимметричного каскада лазерного обогащения для производства урана оружейного качества.

ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ УРАНА ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ

Атомные и молекулярные версии лазерного разделения изотопов использовались для обогащения урана с ограниченным успехом. Лазерное разделение изотопов в атомном паре (AVLIS) включает в себя селективное возбуждение и ионизацию урана-235 в атомном паре урана с использованием лазерного облучения в видимом и ультрафиолетовом диапазонах на двух или трех длинах волн, а наиболее популярная схема молекулярного лазерного разделения изотопов (MLIS) включает отделение атома фтора от молекулы гексафторида урана-235 ($^{235}\text{UF}_6$) с последующим осаждением пентафторида урана-235 ($^{235}\text{UF}_5$) из газа. Ионизация урана-235 в методе AVLIS требует минимальной затраты энергии в 6,1 эВ, а отделение атома фтора в методе MLIS потребует по крайней мере 2,7 эВ. Оба эти метода исследовались в течение прошедших сорока лет, и оба метода были оставлены из-за проблем стоимости, связанных с дорогими химическими операциями, коррозии материалов, низкой частоты повторения лазерных импульсов, или неэффективного лазерного возбуждения⁸.

В противоположность этим предыдущим методам, в системах лазерного разделения изотопов третьего поколения в потоках подачи, продукции и отвалов находится UF_6 ⁹. Общая физическая концепция включает лазерное возбуждение колебаний в молекулах $^{235}\text{UF}_6$, разбавленных в газообразном носителе, что приводит к появлению сил, приводящих к различным скоростям миграции возбужденных молекул гексафторида урана-235 ($^{235}\text{UF}_6^*$) и гексафторида урана-238 ($^{238}\text{UF}_6$) из центральной зоны расширяющейся сверхзвуковой свободной струи¹⁰. Это позволяет частично отделить $^{235}\text{UF}_6$ до конденсации газа¹¹. Метод SILEX является всего лишь одним подходом та-

кого подавления конденсации к лазерному разделению изотопов. Другие вариации концепции в будущем могут стать конкурентами метода SILEX.

Фотоны с длиной волны 16 мкм предоставляют энергию в 0,08 эВ, необходимую для возбуждения колебаний молекулы $^{235}\text{UF}_6$ ¹². Такие фотоны могут быть получены при рамановском рассеянии фотонов с длиной волны 10,2 мкм от мощного импульсного лазера на углекислом газе в конверсионной ячейке на оптически накачиваемом газообразном параводороде¹³. Рамановское рассеяние – это неупругое рассеяние фотонов, и рассеяние на возбужденном вращательном состоянии параводорода позволяет потерять энергию, достаточную для образования фотона с длиной волны 16 мкм. Этот путь необходим, поскольку в настоящее время не имеется мощных лазеров на длине волны 16 мкм для непосредственного возбуждения колебательной моды ν_3 молекулы $^{235}\text{UF}_6$.

Имеется много предложений для использования излучения с длиной волны 16 мкм в процессе SILEX, но другие предлагают применить лазеры на окиси углерода (CO), излучающие фотоны с длиной волны 5,3 мкм, которые могут быть использованы для возбуждения полосы $3\nu_3$. Энергия, поглощаемая при возбуждении, будет в 3 раза больше (0,24 эВ вместо 0,08 эВ), а поперечное сечение перехода $3\nu_3$ будет в 5000 – 10000 раз меньше, чем для полосы ν_3 , что повысит энергию, требующуюся для успешной работы. Сообщают, что частота повторения импульсов лазеров на CO может достигать 10 МГц, что позволит легко облучать все молекулы $^{235}\text{UF}_6$, протекающие через устройство разделения. В сетевом приложении обсуждаются возможные лазеры на CO, способные компенсировать меньшие сечения взаимодействия для полосы $3\nu_3$.

Эксплуатационные характеристики лазера

Консорциум GLE, вероятно, использует в процессе SILEX лазер на углекислом газе с поперечной накачкой газового потока при атмосферном давлении (Transversely Excited Atmospheric – TEA) и системой рамановского сдвига. Этот лазер коммерчески доступен (под экспортным контролем), но рамановский сдвиг должен осуществляться отдельно. При рассмотрении эффективности импульсного лазера с рамановским сдвигом на длине волны 16 мкм для разделения изотопов наиболее важны две его рабочих характеристики: частота повторения импульсов и плотность потока лазерного излучения за импульс. Частота повторения импульсов, или количество импульсов, генерируемых лазером за секунду, указывает на то, какая доля UF_6 будет облучаться лазером. Плотность потока лазерного излучения за импульс, или энергия на единицу площади поперечного сечения пучка, является важным параметром как для обеспечения наиболее экономичного использования фотонов, так и для достижения порога требуемой пиковой мощности для рамановского рассеяния (смотрите сетевое приложение)¹⁴.

Когда UF_6 облучается лазерным излучением, то существует минимальная величина энергии, которой должен обладать каждый лазерный импульс для того, чтобы возбудить колебательные уровни всех молекул $^{235}\text{UF}_6$ ¹⁵. Плотность потока лазерного излучения за импульс в пучке (энергия, деленная на площадь поперечного сечения) должна будет достичь минимального порогового значения для возбуждения всех молекул $^{235}\text{UF}_6$, вытекающих из сопла. Причина состоит в том, что сечение возбуждения колебательной моды σ , или площадь вокруг молекулы $^{235}\text{UF}_6$, через которую должен

будет пройти фотон для того, чтобы произошло возбуждение, и в том, чтобы присутствовало распределение фотонов, которое будет геометрически достаточным для возбуждения всех молекул $^{235}\text{UF}_6$. Поэтому более короткие импульсы с той же самой энергией лучше, чем длинные, если только они будут достаточно длинными, чтобы избежать свержизлучения Дике¹⁶. Если эти фотоны будут распределены по длительности более длинного импульса, то на площадь поперечного сечения придется меньше энергии, чем минимально требуется вдоль каждой ее точки. Зависимость минимальной энергии от поперечного сечения заставляет предположить, что ситуация не будет столь же эффективной, как если бы фотоны были плотно упакованы на площади поперечного сечения в более коротком импульсе. Это требует меньшей энергии и делает метод более экономичным. Разработка методов улучшения плотности потока лазерного излучения за импульс с помощью формирования лазерного импульса является целью исследовательских групп во всем мире¹⁷.

Расчет минимальной плотности потока лазерного излучения за импульс, требующейся для возбуждения всех молекул $^{235}\text{UF}_6$, производится с помощью уравнения баланса заселенности

$$\frac{dN_2}{dt} = W_{12}N_1 - W_{21}N_2 \quad (1)$$

где N_1 и N_2 соответственно концентрации молекул $^{235}\text{UF}_6$ в см^{-3} в основном состоянии и в возбужденном колебательном состоянии ν^3 , W_{12} – вероятность перехода из основного состояния в возбужденное колебательное состояние ν^3 , и W_{21} – вероятность перехода из возбужденного колебательного в основное состояние. Многими возможными процессами, которые могут привести к снятию возбуждения $^{235}\text{UF}_6^*$, представленному членом $W_{21}N_2$ в уравнении (1), здесь можно пренебречь, поскольку они вряд ли смогут внести заметный вклад за время пересечения луча. К ним относятся столкновения между молекулами газа-носителя G и $^{235}\text{UF}_6$, в которых энергия может поглощаться при многих вращательных изменениях энергии молекул $^{235}\text{UF}_6$, которые позволят ей избежать снятия возбуждения при вынужденном излучении¹⁸ и спонтанном излучении¹⁹. Можно избежать существенной релаксации из-за прямых переносов колебаний в столкновениях между молекулами $^{235}\text{UF}_6$ и $^{238}\text{UF}_6$, если концентрация UF_6 в газе-носителе G будет поддерживаться низкой ($<0,05$)²⁰. Единственным иным механизмом перехода молекул $^{235}\text{UF}_6$ в основное состояние будет образование димеров, но этот процесс желателен для лучшего обогащения. Вероятности и скорости этих механизмов снятия возбуждения включены в модель, обсуждаемую в сетевом приложении.

Член dN_2/dt в уравнении (1) показывает, как много молекул $^{235}\text{UF}_6$ может быть возбуждено в единицу времени, и он зависит от многих параметров блока разделения системы SILEX, включая частоту повторения импульсов лазера. Если новый импульс лазера появляется после того же самого времени, которое потребуется молекуле UF_6 для перемещения на диаметр пучка, то тогда будут облучены почти все молекулы UF_6 . Если рассматривать круглое пятно пучка, то некоторые молекулы в верхней и нижней частях пучка останутся не облученными, то в качестве приближения можно предположить, что лазерное покрытие с такой частотой повторения импульсов будет обеспечивать почти полное облучение всех молекул UF_6 . Это позволит записать dN_2/dt как

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{n_{235}}{2R_{beam}/U} \quad (2)$$

где $n_{235} = 0,97 \cdot 10^{19} \rho_{UF_6} / T \cdot 0,007$ – концентрация возбужденных молекул $^{235}UF_6^*$ (в $см^{-3}$) после облучения (0,007 – это концентрация урана-235 в природном уране)²¹. R_{beam} – это радиус пятна пучка и U – скорость сердцевины струи, пересекающей путь пучка.

Вероятность возбуждения за секунду равна

$$W_{12} = \frac{\sigma(\nu_3) I}{h\nu} \quad (3)$$

где $\sigma(\nu_3) \approx 10^{-18} см^2$ – сечение перехода в полосу ν_3 , сильно зависящее от температуры²², I – интенсивность лазера в $Вт/см^2$, и $h\nu = hc/\lambda = 1,25 \cdot 10^{-20}$ Дж – энергия фотона с длиной волны 16 мкм. При условии возбуждения всех молекул $^{235}UF_6$, пересекающих пучок, в уравнении (1) $N_1 = n_{235}$. Из этого следует простое выражение для расчета минимальной интенсивности лазера, требующейся для возбуждения всех молекул $^{235}UF_6$:

$$I_{min} = \frac{Uh\nu}{2\sigma(\nu_3)R_{beam}} \quad (4)$$

Для свободной струи со сверхзвуковой скоростью $U = 3 \cdot 10^4$ см/с и $R_{beam} = 0,5$ см минимальная интенсивность лазера, необходимая для возбуждения всех молекул $^{235}UF_6$, равна 374 Вт/см² при частоте повторения импульсов 30 кГц. В предположении круглого сечения пучка будет возбуждаться только $78,5\%$ молекул $^{235}UF_6$, для чего потребуется мощность только в $374 \times 0,785 = 294$ Вт.

Возвращаясь к плотности потока лазерного излучения за импульс, величина 294 Вт означает, что для возбуждения всех молекул $^{235}UF_6$ понадобится только около 10 мДж за импульс, но будет ли это точной оценкой, зависит от распределения энергии в импульсе. Уравнение (4) фактически является расчетом числа падающих фотонов, требующегося для возбуждения одиночной молекулы $^{235}UF_6$, проходящей через блок разделения. Требуемое число зависит только от $\sigma(\nu_3)$, поскольку R_{beam} и U определяют только время прохождения молекулы через пучок. Если все эти фотоны не приходят в одно и то же время, то существует заметная вероятность того, что молекула останется не возбужденной, поскольку требуемая плотность потока лазерного излучения за импульс слишком мала, чтобы обеспечить возбуждение во всех возможных местоположениях внутри пучка. Именно поэтому требуемое значение потока неточно, и более длительные импульсы нежелательны; распределение фотонов в пространстве не является идеально приспособленным для наивысшей вероятности возбуждения. При достаточно коротких импульсах, длительность которых для лазеров с рамановским сдвигом, как сообщают, может достигать 80 нс²³, минимальная плотность потока лазерного излучения за импульс I_{min} , необходимая для возбуждения всех молекул $^{235}UF_6$, может быть выражена как энергия фотона, деленная на поперечное сечение:

$$\psi_{\min} = \frac{2I_{\min} R_{\text{beam}}}{U} = \frac{h\nu}{\sigma(\nu_3)} \quad (5)$$

В данной статье будет предполагаться, что импульсы в 80 нс достаточно коротки для того, чтобы аппроксимировать полную энергию импульса на единицу площади как меру для плотности потока излучения за импульс, а не только потока энергии.

Другое соображение состоит в том, что плотность потока излучения за импульс достаточно высока для того, чтобы минимальный уровень поддерживался на всей длине блока разделения. Это требует понимания того, как много энергии поглощается на пути распространения лазерного излучения. Для одиночного импульса поглощенная энергия E_{abs} при прохождении на глубину z равна

$$E_{\text{abs}} = h\nu\pi R_{\text{beam}}^2 n_{235} z \quad (6)$$

где n_{235} , представленная ранее в уравнении (1) как N_1 и N_2 , равна концентрации молекул $^{235}\text{UF}_6$. Параметры ρ_{UF_6} и T , от которых зависит n_{235} , относятся к месту, в котором лазер облучает струю. Для лазерного пучка с $R_{\text{beam}} = 0,5$ см наилучшее перекрытие поперечного сечения с сердцевинной струи достигается при $\rho_{\text{UF}_6} = 0,026$ мм рт. ст. и $T = 81$ К. При этих рабочих параметрах $n_{235} = 2,18 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$ и $E_{\text{abs}} = 2,18 \cdot 10^{-5}$ Дж на каждый метр блока разделения. Под длиной блока разделения понимается полная глубина проникновения лазерного излучения в смесь гексафторида урана и газ-носителя при поперечном пересечении свободной струи. Если уравнение (6) просто поделить на πR_{beam}^2 , добавив потери на поглощение, мы получим более полное выражение для ψ_{\min} в уравнении (5)

$$\psi_{\min} = h\nu \left(\frac{1}{\sigma(\nu_3)} + n_{235} z \right) \quad (7)$$

что представляет минимальную плотность потока лазерного излучения за импульс, необходимую для возбуждения всех молекул $^{235}\text{UF}_6$ в блоке разделения длиной z . Мощность, поглощаемая на этой длине, равна поглощенной энергии E_{abs} , умноженной на частоту повторения импульсов лазера.

Если аппроксимировать пятно лазерного пучка одним квадратным сантиметром, то минимальная частота повторения импульсов f_{\min} в герцах, необходимая для облучения всего урана, будет равна величине скорости в сердцевине свободной струи U в сантиметрах в секунду:

$$f_{\min} = |U| \quad (8)$$

Используя более реалистичное круговое пятно пучка, при частоте повторения f_{\min} можно будет облучить всего лишь 78,5% урана, проходящего через блок разделения. Однако, установив зеркало в соответствующем месте, можно будет разрешить эту проблему, и обеспечить 100% облучение²⁴. Такой формализм может быть применен к любой импульсной лазерной системе. В сетевом приложении конструкция импульсно-

го лазера на окиси углерода CO обсуждается в данном контексте при рассмотрении приспособления к значительно меньшему поперечному сечению возбуждения колебательной моды $3\nu_3$.

В 2005 году было раскрыто, что у компании Silex Systems имеются лазеры, работающие с частотой повторения 50 Гц, но что лазеры, способные генерировать импульсы с частотой 300 Гц²⁵, все еще неспособны облучать весь поток подачи. Известно, какие возможности имеются сейчас, но нет никаких физических ограничений для возможности генерировать излучение на длине волны 16 мкм с мощностью в несколько киловатт с частотой повторения импульсов в десятки килогерц. Группа из Южной Африки в 1991 году сообщила²⁶ о лазере, излучающем с мощностью 6 кВт при частоте повторения импульсов 2 кГц, и эти характеристики до настоящего времени остаются рекордными для лазеров TEA CO₂ с рамановским сдвигом, о которых сообщалось в открытой литературе. Намного большие частоты повторения могут оказаться доступными только для разработчиков с максимальной квалификацией, но не ясно, как долго они могут оставаться за пределами возможностей многих стран. В отношении других возможностей можно отметить, что для достижения этих поставленных целей можно различными способами комбинировать несколько лазеров с менее высокими характеристиками, и для этих целей могут быть разработаны другие лазерные системы.

Коэффициент обогащения для лазера на окиси углерода CO с длиной волны 5,3 мкм может оказаться выше, чем для лазера с длиной волны 16 мкм, поскольку для каскада для получения ВОУ с обогащением до 90% потребуется меньше ступеней, и, возможно, меньше пространства. Меньшее количество, или большая неопределенность рыночных сигналов также осложняют слежение за приобретением лазера на CO, или его компонентов, поскольку существует возможность того, что такая система может быть собрана без помощи внешнего поставщика. Важно отметить, что Группа поставщиков ядерного оборудования в 2013 году добавила лазеры на CO, работающие в диапазоне от 5 до 6 мкм, в свой перечень оборудования двойного назначения, который контролируется правительствами всех стран-участниц в соответствии с ее «Руководящими указаниями для сделок с ядерным оборудованием»²⁷. Предполагаемые конструкции с лазерами на CO обсуждаются в сетевом приложении.

ПОДАВЛЕНИЕ КОНДЕНСАЦИИ ЛАЗЕРНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

В возможном процессе SILEX газ UF₆ направляется через сопло в камеру с низким давлением, в которой в результате адиабатического расширения формируются сверхзвуковые свободные струи. Колебательное возбуждение молекул ²³⁵UF₆ позволяет газу противостоять конденсации, вызывая практически мгновенную диссоциацию димеров после их образования, а энергия отдачи, получаемая этими молекулами, позволяет им физически отделяться от молекул ²³⁸UF₆ для их сбора. Небольшой изотопный сдвиг $\Delta\nu_3$ в 0,6 см⁻¹ требует охлаждения газа до низких температур для того, чтобы сузить и разделить перекрывающиеся спектры поглощения и улучшить селективное возбуждение молекул ²³⁵UF₆. В этом разделе будет вкратце рассмотрен этот процесс подавления конденсации и будут представлены подробности конструкции сопла, соотношения между параметрами во время расширения свободной струи и идентифицируемыми ограничениями, влияющими на выбор конструкции.

Расширение сопла и течение свободной струи

Важность высокой изотопической селективности требует, чтобы газ UF_6 охлаждался для того, чтобы сузить и разделить спектры поглощения. Это достигается посредством подачи газа через сопло в откачиваемую камеру для образования сверхзвуковой струи, которая охлаждается по мере адиабатического расширения и ускорения. В отсутствие такого охлаждения тепловое возбуждение приведет к нежелательному возбуждению некоторых молекул $^{238}\text{UF}_6$ из-за перекрытия их спектра колебательного поглощения со спектром молекул $^{235}\text{UF}_6$.

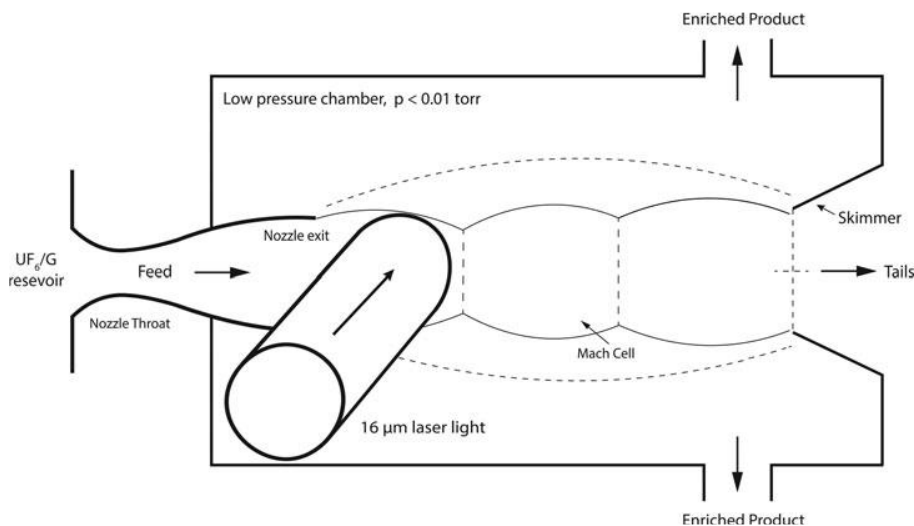


Рисунок 1. Схема блока лазерного разделения изотопов третьего поколения для обогащения урана. Лазер с высокой частотой повторения импульсов настроен для возбуждения колебательной моды $^{235}\text{UF}_6$ поперечно облучает свободную струю UF_6 и газа-носителя G, вытекающую из сверхзвукового сопла в камеру низкого давления. Обогащенный продукт собирается расположенным вниз по течению сепаратором. Надписи на рисунках (слева направо и сверху вниз): 1 – резервуар с UF_6 и газом-носителем G; 2 – горловина сопла; 3 – подача; 4 – камера низкого давления, $p < 0,01$ мм рт. ст.; 5 – срез сопла; 6 – лазерное излучение с длиной волны 16 мкм; 7 – ячейка Маха; 8 – обогащенный продукт; 9 – обогащенный продукт; 10 – сепаратор; 11 – отвалы.

Сверхзвуковых скоростей можно достичь, пропуская газ через сходящийся и расширяющийся канал, обычно называемым соплом Лавала (рисунок 1). Скорость вниз по потоку для сердцевины свободной струи зависит от отношения площадей поперечных сечений среза и горловины сопла и отношения удельных теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме газа струи. Рисунок 1 показывает эволюцию свободной струи по мере ее расширения в камеру низкого давления, и колеблющиеся области расширения и сжатия, которые формируются из-за согласования давления (ударные волны) в течении струи, и называются ячейками Маха. По оценкам, температура газа в струе после прохождения ударной волны может увеличиться на 50–60 процентов по сравнению с начальным значением из-за работы, произведенной

над свободной струей изменением давления²⁹. Это может стать ограничивающим фактором в образовании димеров, которое позволяет процессу SILEX работать, и может осложнить определение оптимальных эксплуатационных характеристик, таких, как температура и давление.

Для успешного подавления конденсации в камере низкого давления обычно сохраняются фоновые газы, откачиваемые до давления менее 0,01 мм рт. ст., представляющие пограничный слой для расширяющейся свободной струи для предотвращения избыточного выброса газа из струи³⁰. Применение миллиметров ртутного столба как единицы давления может показаться старомодным, но учитывая, что 1 мм рт. ст. приблизительно равен 133,3 паскаля (Па), и что смесь газов UF₆/G в резервуаре для подачи перед расширением в сопле находится под давлением 5–200 мм рт. ст.³¹, применение этой единицы давления приводит к более удобным цифрам.

Перед расширением в сопле и возбуждением лазером гексафторид урана UF₆ перемешивается с газом-носителем G, подавляющим передачу энергии между колебательными модами изотопов урана. По этой причине концентрация UF₆ обычно поддерживается на уровне ниже 5 процентов³², но для определения оптимальной концентрации UF₆ нужно провести дополнительные эксперименты³³. Важно, чтобы газ-носитель G был перемешан до расширения, поскольку столкновения с малой энергией между молекулами UF₆ и G в сверхзвуковом потоке делают возможным образование димеров в газе с низкой температурой. Сохранение энергии предотвращает их образование благодаря большой разнице в относительных скоростях между сверхзвуковым потоком UF₆, сталкивающимся с молекулами газа-носителя G, уже находящимися в камере облучения. Поэтому все потоки (подачи, продукта и отвалов) на всех ступенях в каскаде блоков лазерного разделения фактически являются смесью молекул UF₆ и G.

Проектные параметры сопла Лавала должны отвечать балансу требований между лучшим разделением изотопов и переработкой больших объемов UF₆. Например, большие диаметры среза сопла позволят обрабатывать большее количество газа, но это будет достигнуто за счет меньшего коэффициента обогащения, потому что при выходе молекулы ²³⁵UF₆ из более толстой свободной струи произойдет большее количество столкновений. Одним из возможных способов преодоления этого противоречия будет ориентация лазера перпендикулярно свободной струе и облучение газа вдоль более длинного блока разделения, как это показано на рисунке 1. Такая геометрия, по-видимому, наиболее предпочтительна для производства промышленного масштаба, и если можно будет изготовить сопло такой глубины, то будут получены преимущества в обработке большого объема. Если такое сопло нельзя будет изготовить, то для достижения такого преимущества в блоке разделения можно будет установить несколько осесимметричных сопел меньшего размера, хотя это потребует некоторого увеличения занимаемой площади. Конструирование сопла должно будет также определить, в каком месте вдоль струи лазер будет облучать газ, поскольку давление и температура в месте облучения струи повлияют на уровень обогащения продукта. Сопло с большим расстоянием между горловиной и срезом (смотрите рисунок 1) может оказаться предпочтительным из-за того, что облучение внутри сопла поможет образованию димеров (смотрите сетевое приложение), а более плавное предварительное расширение газа предотвратит выбросы³⁴.

Понимание взаимоотношений между геометрией сопла и параметрами потока вниз по течению и ударными волнами желательна, но, к сожалению, теоретические расчеты двумерных свободных струй весьма сложны³⁵. Однако, средние значения с

точностью до порядка величины могут быть получены из следующих одномерных выражений для сверхзвукового расширения³⁶:

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\gamma-1/\gamma} \quad (9)$$

$$\left(\frac{A}{A_t} \right)_2 = \frac{\gamma-1}{2} \frac{\left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{2/\gamma}}{\left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right]} \quad (10)$$

$$\left(\frac{U}{U_{s0}} \right)^2 = \frac{2(1-T/T_0)}{(\gamma-1)} = M^2 \quad (11)$$

Подстрочные индексы 0 и t относятся к условиям во входном резервуаре (до сжатия и расширения в сопле) и в срезе сопла, соответственно, (смотрите рисунок 1); A_t – это площадь поперечного сечения на срезе сопла. Параметры без подстрочных индексов относятся к условиям в сверхзвуковой свободной струе вниз по потоку: A – это площадь поперечного сечения струи и U – это сверхзвуковая скорость объемного потока струи. T и p – это температура и давление в свободной струе вниз по потоку, а T_0 и p_0 представляют те же параметры во входном резервуаре. U_{s0} – это скорость звука в резервуаре, которая может быть рассчитана по формуле

$$U_{s0} = 9116.5 \left\{ \gamma T_0 (K) / m (g / mol) \right\}^{1/2} \quad (13)$$

где m – молярная масса газа-носителя G в граммах на моль³⁷. Отношение U/U_{s0} в уравнении (11) называют числом Маха M . Показатель адиабаты $\gamma = c_p/c_v$, где c_p и c_v – удельные теплоемкости при постоянном давлении и постоянном объеме, является важным параметром при выборе газа-носителя G .

Идея состоит в том, чтобы использовать уравнение (9) для поиска оптимальных значений для T и p , сначала выбрав одно из значений, и затем изменять второе, чтобы найти наивысший коэффициент обогащения. После того, как выбраны T и p , выбор T_0 (обычно около 300 К) определяет p_0 . Уравнение (10) используется для выбора площади горловины сопла A_t и желательного давления p или площади A в свободной струе вниз по потоку. Выбор давления p в местоположении сбора продукта, площади A , обеспечивающей наилучшее перекрытие с пятном лазерного пучка, и размеров сопла (A_t и A), завязываются между собой через уравнение (10). Скорость U определяется температурой T через уравнение (11), и зависит от скорости звука U_{s0} в газе-носителе G . Эти соотношения будут упоминаться и в последующих разделах, но здесь приводятся начальные сведения о том, как они могут быть использованы.

Образование димеров

Для того, чтобы молекула UF_6 оставалась нетронутой, а собранный продукт оставался обогащенным изотопом ^{235}U , необходимо взаимодействие с другим газом. Оно начинается, когда столкновения между молекулами UF_6 и G приводят к образованию слабых связей между ними. Связанные образования в целом называют димерами, и они обычно удерживаются вместе водородными связями или связями Ван дер Вальса. Хотя димеры определяются как две связанные молекулы или атома, в их исследовании доминируют объекты со слабыми связями, поскольку они более вероятно разрываются в столкновениях при давлении, меньшем равновесного давления пара, и вопросы в отношении их динамики пока не разрешены³⁸. Основная идея состоит в том, что, хотя молекулы $^{238}UF_6$ и $^{235}UF_6$ образуют димеры с равной скоростью, их время жизни будет намного меньше, если в их состав будут входить возбужденные лазерным излучением молекулы $^{235}UF_6$ ($^{235}UF_6^*$). Энергия связи Ван дер Вальса (около 0,01 эВ) намного меньше, чем энергия возбужденной моды ν_3 молекулы $^{235}UF_6$ (около 0,08 эВ), и для диссоциации димеров $^{235}UF_6^* : G$ потребуется намного меньше столкновений, чем для диссоциации димеров $^{238}UF_6 : G$, поскольку потенциальная яма притяжения не так глубока. При диссоциации колебательная энергия возбужденной лазерным излучением молекулы $^{235}UF_6$ преобразуется в энергию поступательного перемещения отдачи, и молекула $^{235}UF_6$ начнет более быстро покидать сердцевину струи. Когда будет собран внешний слой газа, он окажется обогащенным изотопом $^{235}UF_6$. Этот процесс показан на рисунке 2. В сетевом приложении будут представлены дополнительные подробности, вместе с введением в зародышеобразование и рост частиц, которые вместе с образованием димеров являются начальными процессами конденсации. Успешное обогащение на лазерных системах третьего поколения включает разделение изотопов урана до того, как в охлаждающейся свободной струе начнется зародышеобразование и рост частиц.

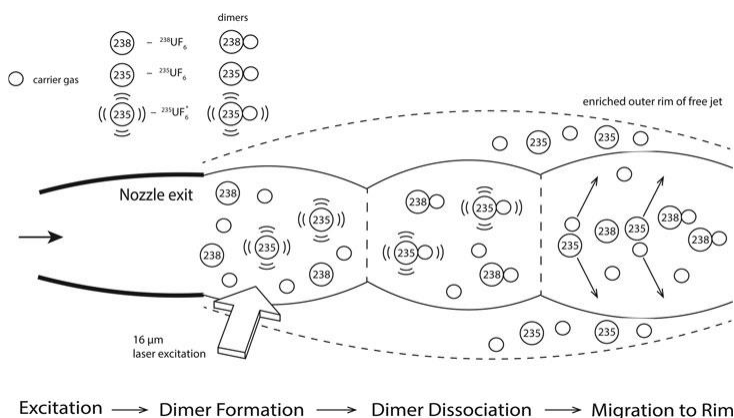


Рисунок 2. Процесс лазерного возбуждения, образования димеров, диссоциации димеров и перемещения для получения обогащенного продукта. Надписи на рисунке (сверху вниз): 1 – димеры; 2 – газ-носитель; 3 – обогащенный внешний слой газовой струи; срез сопла; 4 – возбуждение лазером с длиной волны 16 мкм; 5 – возбуждение → образование димеров → диссоциация димеров → миграция во внешний слой.

Рабочие характеристики процесса SILEX вероятно будут включать давление газа-носителя p_g между 0,03 и 0,002 мм рт. ст. в течение расширения в блоке разделения, и предполагать низкую концентрацию UF_6 в 2 – 10 процентов для ограничения колебательного переноса энергии, и парциальное давление UF_6 p_{UF_6} в интервале от $2 \cdot 10^{-4}$ до $2 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Равновесные давления пара $p_e(T)$ при 100 К, вероятной температуре при облучении лазером, и при 45 К и 25 К, двумя возможными температурами при сборе продукта, будут намного меньшими и соответственно равными $3,97 \cdot 10^{-19}$, $1,54 \cdot 10^{-82}$, и $5,53 \cdot 10^{-249}$ мм рт. ст.³⁹

Время для необратимого роста частиц t_c определяется как время, за которое 20 процентов UF_6 достигнет «критического эмбрионального размера». При давлении $p_{UF_6} = 2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. $t_c = 95$ с при $T = 25$ К из-за малого количества столкновений при столь низкой температуре, но при 45 К оно уменьшается до 0,1 с. При 100 К оно снова возрастет, поскольку для того, чтобы начался необратимый рост, потребуется связать вместе большее количество молекул UF_6 . Поэтому если время пролета от сопла до сепаратора t_r будет меньше 0,1 с, то можно будет избежать существенного роста кластера⁴⁰. Возможность роста кластера важна, когда рассматривается, следует ли при конкретной температуре больше, или меньше разбавлять UF_6 газом-носителем G, что является важным фактором при анализе возможности обработки большего объема UF_6 . Время пролета $t_r < 0,1$ с, вероятно, понадобится для того, чтобы избежать роста кластеров до 20 процентов, и предполагает, что $p_{UF_6} = 2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. будет верхним пределом для допустимого парциального давления для адекватного разделения. В разделе В сетевого приложения представлены дополнительные подробности.

КОЭФФИЦИЕНТЫ ОБОГАЩЕНИЯ И ОПТИМАЛЬНЫЕ РАБОЧИЕ ПАРАМЕТРЫ

Мерой эффективности процесса обогащения является разница концентрации изотопа в материалах продукта и подачи. Это итоговое изменение можно характеризовать коэффициентом обогащения β и коэффициентом обеднения γ , определяемыми как

$$\beta = \frac{N_P / (1 - N_P)}{N_F / (1 - N_F)} = \frac{R_P}{R_F} \quad \gamma = \frac{N_F / (1 - N_F)}{N_T / (1 - N_T)} = \frac{R_F}{R_T} \quad (14)$$

где N_P , N_F , и N_T – соответствующие концентрации $^{235}UF_6$ в продукте, подаче и отвалах, и $R_P = N_P / (1 - N_P)$, $R_F = N_F / (1 - N_F)$, и $R_T = N_T / (1 - N_T)$ – соответствующие относительные изотопные распространенности $^{235}UF_6$ и $^{238}UF_6$ в этих потоках. Коэффициенты β и γ можно перемножить для определения общего коэффициента разделения α между продуктом и отвалами:

$$\alpha = \beta\gamma = \frac{N_P / (1 - N_P)}{N_T / (1 - N_T)} = \frac{R_P}{R_T} = \frac{\beta(1 - \theta)}{1 - \beta\theta} \quad (15)$$

В отличие от β , α зависит от разбавления θ , или доли материала подачи, собранного в потоке продукта. Мерой качества, применяемой для оценки экономики

процесса разделения изотопов, обычно считаются α и θ ; экономика улучшается, если α и θ растут⁴¹. Однако, эти два параметра не являются независимыми. Увеличение одного из них увеличивает другой, и также повлияет на β . Его величина определяет, как много ступеней понадобится для получения ВОУ, обогащенного до 90 процентов, как много времени понадобится для его получения, и он является ключевым элементом любой оценки опасности распространения.

Консервативная оценка β в интервале от 1,5 до 2,5 для лазерного разделения изотопов третьего поколения с подавлением конденсации была представлена Еркеном и Кимом⁴² (аналогичная оценка, не учитывающая динамику расширения свободной струи, приведена в сетевом приложении). Скорее всего, значения $\beta \sim 2$ недооценены, поскольку они получены без динамического моделирования изменения скоростей миграции в крайний слой свободной газовой струи при понижении давления от расширения и охлаждения, которое будет увеличивать β . Майкл Голдсуорси, исполнительный директор компании «Silex Systems Ltd.», заявил, что коэффициент обогащения процесса SILEX лежит в диапазоне от 2 до 20⁴³. Эти коэффициенты обогащения намного больше, чем типичные величины для газовых центрифуг и газодиффузионных систем⁴⁴.

Предыдущее обсуждение позволяет оценить поток урана через одиночный блок разделения, что, в свою очередь, станет основой оценки длины разделения, необходимой для получения ВОУ, обогащенного до 90 процентов. Поток F может быть рассчитан из

$$F (gUF_6 / s) = \frac{d_{jet} n_{UF_6} m (g/mol) z}{6.025 \times 10^{23} molecules / mol} \quad (16)$$

где d_{jet} – диаметр свободной струи, U – скорость объемного потока струи (уравнение (11)), n_{UF_6} – концентрация молекул UF_6 , m – молярная масса UF_6 в граммах на моль, и z – глубина проникновения в блоке разделения. Если $d_{jet} = 2$ см в области сепаратора ($p_G = 0.02$ мм рт. ст. и $T = 35$ К), $U = 3,5 \cdot 10^4$ см/с и $n_{UF_6} = 2,217 \cdot 10^{13}$ молекул/см³, то поток F будет равен 0,0907 г/с, или 2859 кг/год UF_6 для блока разделения длиной в 1 метр (таблица 1). Предполагается, что газом-носителем будет SF_6 .

Таблица 1. Эксплуатационные характеристики и параметры обработки на сепараторе для одиночного блока разделения процесса SILEX длиной в один метр.

| | |
|-------------------------------------|------------------|
| Коэффициент обогащения β | 2 |
| Разбавление θ | 0,25 |
| Давление газа-носителя G | 0,002 мм рт. ст. |
| Температура | 35 К |
| Концентрация UF_6 в газе-носителе | 0,04 |
| Поток UF_6 | 2859 кг/год |
| Поток урана | 1933,4 кг/год |
| Разделительная способность | 257,8 кг-ЕРР/год |

Коэффициент обогащения β также зависит от того, какая доля потока свободной струи облучается лазером в поперечном направлении, поскольку сепаратор (смотри рисунок 1) будет обрезать некоторую часть продукта с края свободной струи даже тогда, когда газ не облучается. Это приводит к различию коэффициентов β для облу-

чаемых и не облучаемых сечений, соответственно обозначаемых здесь как "включенные (on)" и "выключенные (off)". Общее выражение для зависимости β от этих сечений "on" и "off" имеет вид

$$\beta = \frac{\theta_{on}\beta_{on}f_{rep} + \theta_{off}\beta_{off}(f_{min} - f_{rep})}{(\theta_{on} + \theta_{off})f_{min}} \quad (17)$$

где f_{rep} – реальная частота повторения лазерных импульсов и f_{min} – минимальная частота повторения лазерных импульсов, необходимая для облучения всего урана. Когда в уравнении (16) f_{rep} приближается к f_{min} , β приближается к β_{on} .

В этом анализе предполагается, что облучается весь уран, поскольку это может быть наиболее желательным выбором, если каскадирование до 90 процентов в наиболее короткое время будет более важным, чем высокие затраты на приобретение большего количества лазеров или более совершенного лазера. Если пучком лазера с круговым сечением будет облучаться только 78,5 процента урана, то β изменится в соответствии с уравнением (16). Однако, если β_{off} будет малым по сравнению с β_{on} , уровень обогащения не будет значительно меньшим.

Кроме того, важным ограничением в процессе SILEX будет количество материала, которое может быть обработано в одном блоке разделения, или камере облучения. Необходимость облучения газообразного UF_6 при низкой температуре означает, что концентрация молекул UF_6 не может превышать 10^{15} молекул/см³,⁴⁵ потому, что при более высоких плотностях может произойти быстрая конденсация. Имеется несколько параметров, которыми можно будет манипулировать, чтобы в заданное время обрабатывать различные количества $^{235}UF_6$, но похоже, что это значение концентрации молекул будет верхним пределом.

В таблице 1 перечислены рабочие характеристики одиночного блока разделения для процесса SILEX длиной в один метр. Повторим что длина блока разделения – это глубина проникновения в газ излучения лазера в своей поперечно-осевой ориентации по отношению к расширяющейся свободной струе. На основании модели, представленной в сетевом материале, значения $\beta = 2$ и $\theta = 0,25$ ⁴⁶ достигаются при различных давлениях, которые более точно отражают поведение расширяющейся свободной струи, чем статические параметры, принимаемые в модели. Как уже отмечалось, коэффициент обогащения в таблице 1 скорее всего недооценен, но имеет значение, как консервативный входной параметр для каскада обогащения ВОУ до 90 процентов. В результате, полная длина блока разделения в следующем разделе представляет оценку верхнего уровня для производства существенного количества ВОУ, обогащенного до 90 процентов за один год⁴⁷.

КАСКАДЫ ДЛЯ ВЫСОКООБОГАЩЕННОГО (ДО 90 ПРОЦЕНТОВ) УРАНА

Сводка параметров двух моделей каскадов в сетевом приложении приведена в таблице 2. Требуемая длина блока разделения базируется на потоке 1933,4 кг урана через блок разделения длиной в один метр в год (таблица 1). Эти требования были определены в предположении отсутствия перемешивания в каскаде. Это предположение сохраняет работу разделения, но оно может не привести к максимальной энергетической эффективности каскада. В данном анализе не рассматриваются та-

кие альтернативные схемы.

Таблица 2. Сводка требований по ресурсам урана и пространства для производства материала оружейного качества с использованием асимметричных каскадов с концентрациями в исходном сырье урана, равными $N_F = 0,035$ и $N_F = 0,007$.

| | $N_F = 0,035$ | $N_F = 0,007$ |
|--|-------------------------------|-------------------------------|
| Производительность по 90-процентному ВОУ | 36,4 кг/год | 32,5 кг/год |
| Отношение подачи к продукту | 27,5 кг на кг | 153,8 кг на кг |
| Внешняя подача урана (масса, объем ⁴⁸) | 1000 кг, 0,05 м ³ | 5000 кг, 0,26 м ³ |
| Внешняя подача UF ₆ (масса, объем ⁴⁹) | 1480 кг, 16,29 м ³ | 7400 кг, 81,47 м ³ |
| Полная требуемая длина блока разделения | 11,37 м | 35,25 м |

Из-за того, что при перемещении вверх по каскаду степень обогащения повышается, то, вероятно, может быть использовано более высокое содержание урана в газе-носителе, поскольку неблагоприятное влияние на селективность колебательного переноса энергии между ²³⁵UF₆ и ²³⁸UF₆ становится менее ограничивающим. Поскольку четкой модели пределов указанного механизма дезактивации не существует, и если возможны концентрации в газе-носителе, превышающие 0,05, то может потребоваться меньшая длина блока разделения. Будет ли такое возможно, зависит от того, что будет измерено в лаборатории на блоках разделения.

Пакетная переработка

Пакетная переработка позволяет произвести ВОУ с обогащением 90 процентов за меньшее время, чем в схеме с каскадным соединением, но это преимущество требует больше уранового сырья для начала работы, поскольку в ней для питания следующей ступени используется только продукт предыдущей ступени. Такое использование урана не эффективно, поскольку в нем не перерабатываются отвалы, и это в особенности справедливо для процесса SILEX, в котором разбавление продукта обычно довольно заметно. Однако, привлекательность пакетной переработки в процессе SILEX зависит от величины β и, очевидно, что при $\beta \sim 10$ она станет самым быстрым путем для приобретения ядерного оружия.

Используя модель из сетевого приложения, в которой θ зависит от концентрации урана-235 в подаче, а $\beta = 2$, получаем, что производство 25 кг 90-процентного ВОУ потребует 8 ступеней. Для этого понадобится 49 382 кг уранового сырья, обогащенного до 3,5 процентов, с $\theta = 0,36$ на первой ступени и $\theta = 0,43$ на второй⁵⁰. Таким образом, на 1 кг 90%-процентного ВОУ понадобится 1975 кг 3,5-процентного уранового сырья. Напротив, для производства ВОУ оружейного качества в пакетной переработке на центрифугах понадобится только 90 кг 3,5-процентного уранового сырья⁵¹. Эти параметры отдают явное предпочтение центрифугам, поскольку требования по урановому сырью представляются слишком высокими.

Однако, по мере увеличения β потребуется меньше ступеней и меньше урана. В таблице 3 показаны требования к урановому сырью для $\beta = 2, 3$ и 10. Если $\beta = 3$, то требуемое количество уранового сырья 1562 кг на килограмм материала оружейного качества все еще кажется неприемлемо высоким, но при $\beta = 10$ 42 кг сырья на килограмм 90-процентного ВОУ предоставит привлекательный путь к ядерному оружию. Кроме того, без объявленного предприятия типа SILEX обогащенное до 3,5 процентов сырье, вероятно, будет отводиться с объявленного центрифужного предприятия,

что делает такой путь для тайного завода менее вероятным. Однако, если используется сырье из природного урана, то требование всего 151 кг сырья на килограмм материала оружейного качества для $\beta = 10$ становится вполне приемлемым для страны, стремящейся получить ядерное оружие. Дополнительное требование длины блока разделения, равной всего лишь 2,53 м, возможно, сделает приобретение материала оружейного качества на столь малом пространстве наиболее привлекательной особенностью. Вероятность этого пути, по-видимому, будет зависеть от того, в такой точке интервала от 2 до 20 окажется параметр β .

Таблица 3. Сводка требований по ресурсам урана и длины блоков разделения для производства 25 кг 90-процентного ВОУ с использованием пакетной переработки с концентрациями в исходном сырье урана, равными $N_F = 0,035$ для $\beta = 2, 3$ и 10 и $N_F = 0,007$ $\beta = 10$.

| | | | | |
|----------------------------------|----------|----------|---------|---------|
| Коэффициент обогащения β | 2 | 3 | 10 | 10 |
| Количество ступеней | 8 | 6 | 3 | 4 |
| Концентрация в сырье N_F | 0,035 | 0,035 | 0,035 | 0,007 |
| Сырье на 1 кг ВОУ (90%) | 1975 кг | 1562 кг | 42 кг | 151 кг |
| Внешнее урановое сырье | 49382 кг | 39061 кг | 1049 кг | 3774 кг |
| Требуемая длина блока разделения | 38,7 м | 26,4 м | 0,7 м | 2,53 м |

МИНИМАЛЬНОЕ ПРОСТРАНСТВО, НЕОБХОДИМОЕ ДЛЯ ПРОЦЕССА SILEX

Оценка площади, необходимой для размещения предприятия лазерного обогащения третьего поколения, основанная на модели типа SILEX, предполагает, что на тайном предприятии будет применять каскад типа "три вверх, две вниз" (как это описано в сетевом приложении), и будет использовать только 5000 кг природного урана или 7400 кг UF_6 . На рисунке 3 показана возможная схема размещения. 39 ступеней размещены в трех параллельных потоках продукта, который собирается в ступенях 37, 38 и 39. Размеры ступеней на схеме показаны не в масштабе, поскольку в каждой ступени поток будет различным, но для полной длины разделения в 32,5 м длина каждого из потоков продукта предполагается равной 13 м, чтобы учесть пространство между ступенями и помещение для зеркал в конце потока. Длина каждой рамановской ячейки сдвига (обсуждаемой в сетевом приложении) равна 4 м. В полной ширине каждого потока продукта в 6 м выделено 2 м на обеспечение доступа к оборудованию. Добавив 2 м между рамановскими ячейками сдвига и стеной для распространения лазерного пучка и доступа рабочих, получаем полное требуемое пространство для потоков продукта и рамановских ячеек сдвига, равное $20 \text{ м} \times 6 \text{ м}$, или 120 м^2 .

Размеры оптической скамьи на рисунке 3 предполагаются равными $5 \text{ м} \times 2 \text{ м}$, и каждая лазерная стойка спроектирована для вертикальной установки 4 лазеров на каждый поток продукта. Размеры каждого лазера примерно равны $2 \text{ м} \times 1 \text{ м}$ (на основании данных, представленных коммерческими поставщиками). Оптическая скамья может поддерживать дополнительные лазеры ТЕА, используемые в качестве усилителей, и любую оптику, необходимую для настройки и сужения лазерного пучка. Бак для хранения твердого UF_6 может иметь различные размеры, и может быть расположен вертикально для сокращения площади на полу, но он должен вмещать два кубических метра при плотности 5090 кг/м^3 . Оставшееся оборудование состоит из масс-спектрометра для измерения концентрации $^{235}UF_6$, и резервуары для хранения

UF₆ перед расширением в соплах. Место для компрессоров и вакуумных насосов найти легко, так что все необходимое оборудование может поместиться на нескольких квадратных метрах. Вакуумный насос нужен для понижения давления смеси SF₆/UF₆ с 760 до 57,6 мм рт. ст., и на рисунке 3 показано соединение, на котором показан только один резервуар низкого давления перед расширением в сопле. Его размер незначителен, поскольку хранение при 760 мм рт. ст. будет занимать меньшее место. Резервуары под давлением 57,6 мм рт. ст. перед расширением в сопле потребуются для всех ступеней каскада, и это отмечается на рисунке рядом с номером ступени небольшим прямоугольником, открытым с одного конца. В предположении прямоугольной комнаты для размещения оборудования дополнительно остается еще 117 м². Тогда размеры зала будут равны 20 м × 15 м, или 300 м². Следует отметить, что если страна, стремящаяся осуществить тайное разделение, захочет уменьшить занимаемую площадь, то три потока продукта можно будет разместить друг над другом. Это позволит укоротить одну из сторон на 4 м и оставить минимальную площадь в 220 м².

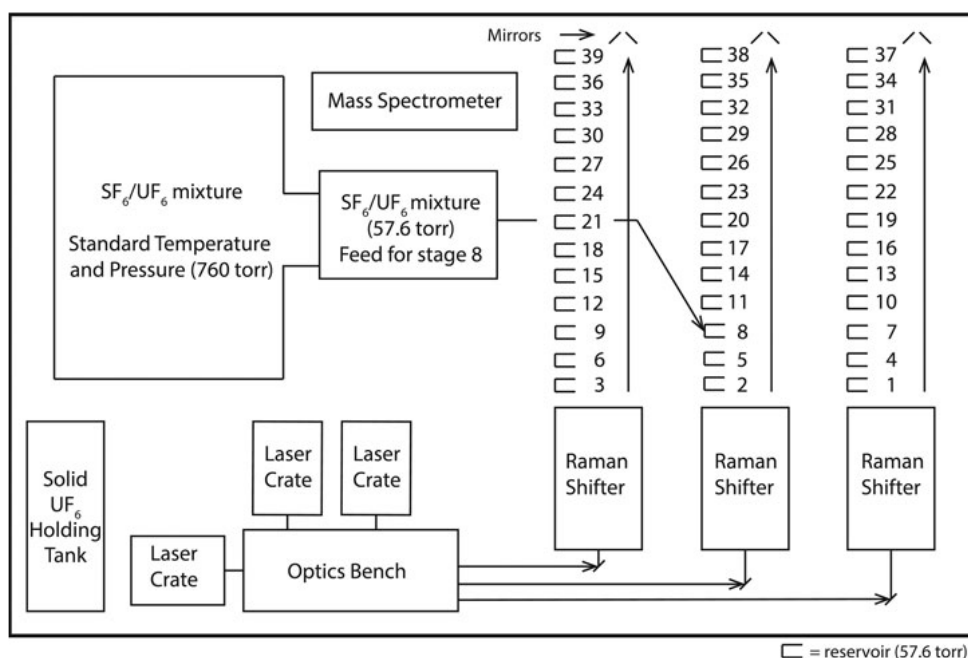


Рисунок 3. Занимаемая площадь (15 м × 20 м = 300 м²) для размещения оборудования SILEX, способного производить 32,5 кг ВОУ, обогащенного на 90 процентов, в год. Надписи на рисунках (слева направо и сверху вниз): 1 – бак для хранения UF₆; 2 – смесь SF₆/UF₆ при стандартной температуре и давлении (760 мм рт.ст.); 3 – лазерная стойка; 4 – лазерная стойка; 5 – оптическая скамья; 6 – масс-спектрометр; 7 – смесь SF₆/UF₆ при давлении 57,6 мм рт.ст., подача в ступень 8; 8 – лазерная стойка; 9 – зеркала; 10 – рамановская ячейка сдвига; 11 – рамановская ячейка сдвига; 12 – рамановская ячейка сдвига; 13 – резервуар (57,6 мм рт.ст.).

Если предположить, что та же самая площадь для баков, резервуаров для хранения при низком давлении, масс-спектрометра, компрессоров и вакуумных насосов (117 м²) потребуется и для центрифуг, то можно будет провести прямые сравнения

между технологиями. Для установки с производительностью в 5000 ЕРР с центрифугами с производительностью 24 ЕРР (заявленная разделительная способность иранской центрифуги IR-8)⁵², потребуется 208 м² (в предположении, что на каждую центрифугу приходится 1 квадратный метр). Добавив один метр с каждой стороны для доступа к машине, и вычтя пространство, необходимое для оптической скамьи и лазеров системы типа SILEX, получим, что для предприятия с центрифугами IR-8 потребуется около 370 м². Если на предприятии с производительностью 5000 ЕРР будут использоваться центрифуги URENCO с производительностью 100 ЕРР, то потребуется общая площадь всего лишь в 189 м².

Оценка, по которой предприятие типа SILEX потребует пространства в интервале между предприятиями с усовершенствованными центрифугами IR-8 и центрифугами URENCO, позволяет предположить, что оно может быть скрыто в здании, аналогичном по размеру зданиям, используемым для многих других целей. Различные правдоподобные оценки размеров баков для хранения не относятся к делу, поскольку такое оборудование может быть вытянуто по вертикали, чтобы ограничить используемую площадь пола. В оценке площади для такого предприятия предполагалось, что коэффициент обогащения $\beta \sim 2$, и она может соответственно сократиться при более высоких значениях β , как обсуждалось ранее.

МИНИМАЛЬНОЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ

Минимальное потребление мощности P_{\min} для системы лазерного обогащения третьего поколения, подобной SILEX, вероятно, будет в основном определяться требуемым минимальным количеством фотонов для возбуждения всех молекул $^{235}\text{UF}_6$. Она может быть выражена как минимальная плотность потока лазерного излучения за импульс ψ_{\min} , умноженная на скорость сердцевины свободной струи U :

$$P_{\min} = \psi_{\min} U = h\nu \left(\frac{1}{\sigma(\nu_3)} + n_{235} z \right) U \quad (18)$$

Для блока разделения длиной в один метр с лазером, облучающим при давлении $p_0 = 0,026$ мм рт. ст. и температуре $T = 81$ К, требующаяся мощность лазера равна 374 Вт, а энергопотребление равно 3276 кВт·час/год. При производительности разделения такого блока в 257,8 кг-ЕРР/год потребляемая энергия лазера будет равна всего 12,7 кВт·час/ЕРР. Для длины разделения в десять метров минимальная мощность для облучения всего урана поднимается до 381 Вт. При этом потребляемая энергия понижается до 1,29 кВт·час/ЕРР.

Для современных центрифуг, поставляемых Компанией технологии обогащения (Enrichment Technology Company – ETC) на заводы URENCO, или центрифуг Американского центрифужного завода (American Centrifuge Plant – ACP), требуются около 50 кВт·час/ЕРР⁵³. Оценка 12,7 кВт·час/ЕРР (или 1,29 кВт·час/ЕРР для десяти метров) слишком низка, если учесть, что длина волны излучения 10,2 мкм должна быть изменена до 16 мкм, а энергетическая эффективность этого процесса равна всего лишь 55 процентам⁵⁴. Кроме того, электрооптическая эффективность лазера ТЕА на углекислом газе до рамановского сдвига лежит в пределах от 15 процентов⁵⁵ до 26 процентов⁵⁶. С учетом этих потерь оценка потребляемой энергии изменяется до 88,8 –

154 кВт·час/ЕРР при длине в один метр и 9,02 – 15,6 кВт·час/ЕРР при длине в десять метров.

Кроме потребления энергии лазерами, в операциях процесса SILEX следует учитывать энергетические затраты вакуумных насосов и газовых компрессоров. Вакуумные насосы выполняют две задачи: изменить давление смеси UF₆/G от атмосферного давления до желательного давления в резервуаре прямо перед расширением в сопле, и откачать камеры облучения внутри блоков разделения до давления несколько ниже 0,01 мм рт.ст. При использовании коммерчески доступных жидкостно-кольцевых вакуумных насосов с всасывающей способностью 68 м³/час⁵⁷, для откачки 68 м³ от стандартного давления в 760 мм рт. ст. до желательного давления в резервуаре в 57,6 мм рт.ст. потребуется мощность в 1,5 кВт. Это соответствует потреблению энергии в 0,41 кВт·час/ЕРР⁵⁸. Для откачки камер облучения до 0,005 мм рт.ст. потребуется всего лишь 6·10⁻⁶ кВт·час/ЕРР⁵⁹. Сжатие газа от 0.002 мм рт.ст. после сбора до 57.6 мм рт.ст. для следующей ступени моделируется политропным процессом и расчетное значение потребляемой энергии равно 0,37 кВт·час/ЕРР⁶⁰.

Сводка потребностей системы типа SILEX в электроэнергии приведена в таблице 4. Значение 50 кВт·час/ЕРР, показанное для заводов URENCO, представляет современное состояние энергетической эффективности центрифужной технологии. В зависимости от длины блока разделения, энергопотребление завода типа SILEX может быть либо меньше, либо больше этой величины. Блоки длиной всего в несколько метров будут потреблять меньше энергии, чем центрифуги URENCO. Например, завод типа SILEX при расходе энергии в 10 кВт·час/ЕРР будет потреблять столько же энергии, сколько потребляет продовольственный магазин в Соединенных Штатах с площадью в 100 м².⁶¹

Таблица 4. Сводка потребностей в электроэнергии, относящихся к лазерам, вакуумным насосам, газовым компрессорам для блоков разделения длиной в один метр и десять метров. Для сравнения в последнем столбце приведены данные по электропотреблению центрифуг на заводе URENCO (или Американском центрифужном заводе). N.A. – не имеет отношения.

| Потребности в электроэнергии | Один метр кВт·час/ЕРР | Десять метров кВт·час/ЕРР | URENCO кВт·час/ЕРР |
|---|--------------------------|------------------------------|-----------------------|
| Энергопотребление лазеров | 88,8 | 9,02 | N.A. |
| Насос для резервуара (от 760 до 57,6 мм рт.ст.) | 0,41 | 0,41 | N.A. |
| Насос для камеры облучения (от 57,6 до 0,005 мм рт.ст.) | 6·10 ⁻⁶ | 6·10 ⁻⁶ | N.A. |
| Сжатие для резервуара (от 0,002 до 57,6 мм рт.ст.) | 0,37 | 0,37 | N.A. |
| Общее энергопотребление | 89,6 | 9,80 | 50 |

КОМПЕТЕНТНОСТЬ В ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Лазеры широко используются в многочисленных направлениях научных исследований и отраслях промышленности, и понимание лазерной физики и технологии расширяется и растет. В принципе, это приводит к тому, что лазерные системы обогащения лежат в пределах досягаемости многих стран. Однако, некоторые системы лазерного обогащения третьего поколения выставляют особые требования, и они

могут потребовать дополнительных познаний.

Имеется несколько типов лазеров с рабочими характеристиками, необходимыми для применения в технологии лазерного обогащения третьего поколения (смотрите сетевое приложение). Как отмечалось ранее, консорциум GLE, вероятно, будет использовать в процессе SILEX систему TEA CO₂ с рамановским сдвигом. От этого лазера требуется, чтобы пиковая мощность, падающая на рамановскую ячейку, была достаточно высока, чтобы генерировать импульсы с энергией около 10 мДж, способные селективно возбуждать весь уран-235, протекающий поперек лазерного пучка. Это может потребовать комбинирования нескольких пучков от лазеров на углекислом газе различными способами, в зависимости от того, такие лазеры доступны стране, пытающейся наладить скрытое обогащение; кроме того, может также понадобиться настройка длины волны лазера и сужение его ширины линии. Эти навыки опираются на методики, требующие знания излучения и оптики, но не обязательно подробного знания лазеров. Однако, рамановский сдвиг, возможно, потребует инженеров, опытных в юстировке зеркал с высокой отражательной способностью, допускающих многократное прохождение лазерного излучения. Кроме того, такие лазеры работают при высоком давлении (около 5 – 8 атмосфер), и хотя имеются коммерчески доступные системы, пользователям которых, как утверждают изготовители, не требуется обращаться с газом высокого давления, такое обращение, по-видимому, является наиболее серьезным техническим навыком при работе с такими системами. Такой навык обычно не требуется от тех, кто знаком с лазерами, а об обеспечении стабильности газа сообщали как об известной проблеме. Знание других методов может ослабить нужду в таком навыке, а будущие усовершенствования лазера, которые не потребуют сложного управления газом высокого давления, уменьшат разнообразие технических навыков, требующихся для успешной эксплуатации систем типа SILEX.

Остается возможность того, что усовершенствованная методика рамановского сдвига ограничит потребность в лазерных средах высокого давления за счет понижения порога пиковой мощности для рамановского излучения, или что в системах типа SILEX могут быть применены другие типы лазеров. Такие лазеры включают другие импульсные системы на углекислом газе или лазеры на окиси углерода, в которых UF₆ облучается внутри лазерного резонатора. Хотя навыки работы с зеркалами, настройки длины волны, и сужения ширины линии вероятно могут оказаться необходимыми, было бы ошибкой считать, что эти навыки недоступны людям без формальной технической подготовки. Другие коммерчески доступные лазеры могут быть различными способами скомбинированы для обогащения урана при достаточной целенаправленности, а возможности лазеров все время улучшаются. У многих лазеров можно будет сократить длительность импульсов и увеличить энергию в импульсе, увеличив давление в усиливающей среде лазера и используя более усовершенствованные методы формирования высокочастотных импульсов или модуляции добротности.

Более подробное техническое обсуждение этих вопросов представлено в сетевом приложении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Третье поколение технологии лазерного обогащения урана, вероятным примером которого может быть процесс SILEX, может создать новые риски распространения. Представляется, что такая система может быть сконструирована и построена

для обогащения урана до уровня оружейного качества с энергетической эффективностью, лучшей, чем у современных центрифуг URENCO. В некоторых конструкциях лазерного обогащения и каскадов эффективность может быть выше примерно в 5 раз, и, возможно, намного больше. Это оказывает непосредственное влияние на возможность обнаружения секретного предприятия лазерного обогащения, основанного на величине потребления энергии.

Оценено, что площадь, необходимая для размещения завода лазерного обогащения, способного произвести около 30 килограммов урана, обогащенного до 90 процентов (что достаточно для изготовления более одного ядерного заряда в год), составит примерно 300 м². Эта оценка, без сомнения, достаточно щедрая. Спутниковая разведка, старающаяся выделить здание, в котором ведется такая деятельность, среди прочих зданий такого размера, вряд ли принесет полезную информацию. Потребление энергии будет меньше, чем у сравнимого центрифужного завода.

Эти выводы позволяют предположить, что лазерное обогащение третьего поколения предоставляет новый технологический подход к урану оружейного качества и разработке ядерного оружия, главным технологическим барьером для которого станет приобретение пригодного лазера. Риск состоит в том, что продолжающееся развитие лазеров и успешно продемонстрированное коммерческое развертывание лазерного обогащения могут побудить многие государства стремиться развить свои собственные программы исследования лазеров, которые могут предоставить им потенциальную возможность создания ядерного оружия. Однако, исследовательские программы по лазерам, относящимся к обогащению урана третьего поколения, могут также использоваться для других приложений, что усложняет идентификацию намеченной цели оборудования и программ. Внимание должно быть направлено на лазерные системы, способные обогащать уран до уровня оружейного качества, которые могут привести к возникновению опасения распространения, сравнимые, или даже большие, чем опасения, связанные с разработкой газовых центрифуг или выделением плутония.

БЛАГОДАРНОСТИ

Я хотел бы поблагодарить редакторов журнала «Наука и всеобщая безопасность» за полезные предложения и комментарии по исправлениям этой статьи. В частности, я глубоко признателен Себастьяну Филиппу за его помощь в переработке окончательного варианта статьи.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. "Silex Systems Third Generation Laser-Based Uranium Enrichment Technology," Silex Systems Ltd., <http://www.silex.com.au/businesses/silex.aspx>
2. "GE Laser Enrichment Facility Licensing," United States Nuclear Regulatory Commission, last modified 28 August 2015, <http://www.nrc.gov/materials/fuel-cycle-fac/laser.html>.
3. "Silex Systems - Operational Update," Silex Systems Ltd., последнее изменение 21 августа 2015 года, <http://www.silex.com.au/downloads/asxannouncements/8-slx-operational-update-210815-final>.
4. О примере работы, проведенной в России, смотрите в Igor Y. Baranov and Andrey V. Koptev, "Mode-Locked CO Laser for Isotope Separation of Uranium Employing

- Condensation Repression,” *Advances in Optical Technologies* (2010). О примере работы, проведенной в Индии, смотрите в U. Nundy and M. Kumar, “Generation of Tunable 16 p,m Radiation from CO₂ by Cascade Lading,” *Pramana—Journal of Physics* 79 (2012). О примере работы, проведенной в Китае, смотрите в D. J. Li et al., “Stimulated Rotational Raman Scattering at Multiwavelength under TEA CO₂ Laser Pumping with a Multiple-Pass Cell,” *Laser Physics* 22 (2012).
5. Nuclear Regulatory Commission, Proposed Rules “Francis Slakey on Behalf of the American Physical Society; Receipt of Petition for Rulemaking,” *Federal Register* 75, (23 December 2010): 80730, <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2010-12-23/pdf/2010-32242.pdf>.
 6. “Letter to the NRC on Laser Enrichment Technology,” Physicians for Social Responsibility, accessed April 28, 2012, <http://www.psr.org/resources/nrc-proliferation-risk-assessment.html>
 7. Elaine M. Grossman, “Closely Held Report Discounts Proliferation Risk of Lasers for Making Nuclear Fuel,” *Global Security Newswire*, 24 May 2012, accessed 8 February 2016, <http://www.nti.org/gsn/article/closely-held-report-discounts-proliferation-risk-lasers-making-nuclear-fuel/>
 8. J. W. Eerkens and J. Kim, “Isotope Separation by Selective Laser-Assisted repression of Condensation in Supersonic Free Jets,” *AIChE Journal* 56 (2010): 2335, accessed 25 August 2015, doi: 10.1002/aic.12212
 9. D. Rousseau et al., “Isotopic Separation by Laser Based Technologies: Safeguard Related Aspects,” IAEA-CN-184/262, 2010, accessed 8 February 2016, <https://www.iaea.org/safeguards/symposium/2010/Documents/PapersRepository/262.pdf>.
 10. Eerkens and Kim, “Isotope Separation by Selective Laser-Assisted Repression of Condensation in Supersonic Free Jets,” 2333. (ссылка 8)
 11. J. W. Eerkens, “Separation of Isotopes by Laser-Assisted Retardation of Condensation (SILARC),” *Laser and Particle Beams* 16 (1998): 295-316.
 12. Реальная длина волны для колебательной моды ν_3 молекулы ²³⁵UF₆ равна 15,916 мкм, но величина 16 мкм упоминается как требуемая длина волны так часто, что автор решил продолжить эту практику и использовать значение 16 мкм, чтобы избежать любой путаницы.
 13. МАГАТЭ подтвердило этот аспект процесса SILEX в работе Rousseau, “Isotopic Separation by Laser Based Technologies: Safeguard Related Aspects,” и Лос-Аламосская национальная лаборатория подтвердила этот аспект процесса SILEX в работе John L. Lyman, “Enrichment Separative Capacity for SILEX,” LA-UR-05-3786, 2005.
 14. Ширина линии лазера также может быть показателем, поскольку если она будет шире, чем ширина спектра поглощения ²³⁵UF₆, то использование фотонов будет менее эффективным, а перекрытие со спектром ²³⁸UF₆ отрицательно повлияет на селективность. По-видимому, это не будет существенно для лазера TEA CO₂, но может стать проблемой для других лазеров. Смотрите A. V. Kunets et al., “Diode Laser Measurements of a Pulsed TEA CO₂ Laser Linewidth,” *Optics Communications* 84 (1991): 37-41. Согласно измерениям, ширина спектральной линии Γ лазера TEA CO₂ равна $\Gamma = 0,013 \pm 0,002 \text{ см}^{-1}$ (полная ширина на половине максимума). Однако, важность такой узкой ширины линии зависит от центровки выхода лазера TEA CO₂ на правильной длине волны до рамановского сдвига, но когда эта техническая проблема была решена, в научной литературе не было указаний на

- то, что изотопная селективность была существенно нарушена из-за нежелательного колебательного возбуждения молекул $^{238}\text{UF}_6$. Дополнительные обсуждения лазеров TEA CO₂ приведены в сетевом приложении.
15. Для молекулы, подобной $^{235}\text{UF}_6$, с многими вращательными подуровнями, стимулированного излучения в сторону основного состояния можно избежать колебаний ее вращательного состояния с J до $J \pm 1$ в нескольких столкновениях без изменения ее возбужденного колебательного состояния. Это позволяет максимальной доле колебательно возбужденных молекул $^{235}\text{UF}_6$ превысить 50 процентов, с возможными 100 процентами, если минимизировать потерю энергии колебательного возбуждения $k\nu$ при столкновениях с молекулами газа-носителя G, и если скорость возбуждения лазером k_A будет велика по сравнению с $k\nu$.
 16. Сверхизлучение Дике возникает, когда короткий импульс слишком быстро возбуждает (или «отбеливает») совокупность молекул перед тем, как произойдут любые столкновения, что приведет к лазерному излучению фотонов соответствующему воздействию на селективное возбуждение. В таком случае, популяция молекул $^{235}\text{UF}_6$, которые могут быть возбуждены, не будет превышать 50%. Этого явления можно будет избежать, если импульсы будут достаточно длинными, чтобы позволить произойти изменениям во вращательном состоянии (обычно >50 нс).
 17. О примере исследований в Китае, смотрите D. J. Li et al., "Stimulated Rotational Raman Scattering at Multiwavelength under TEA CO₂ Laser Pumping with a Multiple-Pass Cell." Об исследовании южно-африканской группы, смотрите в индийском физическом журнале E. Ronander, H. J. Strydom, and L. R. Botha, "High-pressure Continuously Tunable CO₂ Lasers and Molecular Laser Isotope Separation," *Prana—Journal of Physics* 82 (2014). Это также создает проблему для рамановского рассеяния, поскольку пороговая мощность должна быть достигнута для любого возможного излучения на длине волны 16 мкм. Это более подробно обсуждается в сетевом приложении, но главная идея состоит в том, что если в каждом из двух импульсов содержится энергия в 1 Дж, то у импульса с меньшей длительностью пиковая мощность будет больше.
 18. Erkens, "Separation of Isotopes by Laser-Assisted Retardation of Condensation (SLARC)." (ссылка 11)
 19. Erkens, "Laser-induced Migration and Isotope Separation of Epi-Thermal Monomers and Dimers in Supercooled Free Jets." (ссылка 8)
 20. Там же.
 21. Там же.
 22. Эта зависимость от температуры возникает из-за уширения допустимых длин волн, которые могут колебательно возбуждать $^{235}\text{UF}_6$ в столкновениях между молекулами $^{235}\text{UF}_6$ и газа-носителя G. Согласно J. W. Eerken, *Rocket Radiation Handbook, Volume II. Model Equations for Photon Emission Rates and Absorption Cross-Sections* (United States Department of Commerce, 1973), поперечное сечение поглощения можно записать как

$$\sigma_{mn} = 0.0960 \nu_{mn} (C_{mn} / \omega_n)_{vib} (R_{mn}^2)_{vib} g_c(\nu, \nu_{mn}, \Delta \nu_{mn}),$$
 где C_{mn} , ω_n , и R_{mn} – соответствующие безразмерные коэффициенты «соединения», матричные коэффициенты перехода, и коэффициенты «взвешивания» вырождения. Функция столкновительного уширения g_c задается выражением

$$\frac{1}{(\Delta \nu_{mn})} \left[\frac{\left[\frac{(\Delta \nu_{mn})_c}{\pi} \right]^2}{(\nu - \nu_m)^2 + \left[\frac{(\Delta \nu_{mn})_c}{\pi} \right]^2} \right], \text{ где } \nu, \nu_{mn}, \text{ и } \Delta \nu_{mn} - \text{соответствующая ча-}$$

стота падающего лазерного излучения, частота колебательного перехода, и уширенный спектр поглощения с полной шириной на половине максимума (FWHM) спектра, соответственно. Подстрочный индекс "с" обозначает «столкновительный». Уширение $(\Delta \nu_{mn})_c = (\Delta \nu_{mn})_c = 3.3841 \cdot 10^{26} \sigma_{1-2} p / \sqrt{\mu_{1-2} T}$, где p и T – давление и температура приведенная масса, а σ_{1-2} и μ_{1-2} – поперечное сечение столкновения и приведенная масса молекул 1 и 2. В предположении равенства частоты падающего лазерного фотона $\nu = \nu_{mn}$, $\sigma_{mn} \propto T^{1/2}$. Допплеровское уширение также зависит от температуры, но это предполагается несущественным для лазерного облучения в поперечном направлении. Однако, оно может стать существенным фактором в коаксиальной геометрии.

23. Erkens, "Separation of Isotopes by Laser-Assisted Retardation of Condensation (SILARC)." (ссылка 11)
24. Применение зеркал может оказаться важным фактором в геометрическом проектировании технологии SILEX. После однократного прохождения лазерного излучения два зеркала под 90-градусным углом могут направить излучение обратно к лазерному источнику в любом желаемом положении параллельно падающему пучку. Единственными ограничениями будут размеры зеркал, а также то, как параметры струи в дополнительных облучаемых положениях могут повлиять на разделение. Количество дополнительных проходов лазерного пучка n может увеличить эффективную частоту повторения лазерных импульсов на множитель $n + 1$. Такая оценка не будет точной, если единственной целью будет увеличение степени облучения урана в круглом пятне пучка в 78,5 процента до 100 процентов. В таком случае потребуется некоторое перекрытие с падающим пучком, так что дополнительные лазерные проходы не будут связаны с эффективной частотой повторения импульсов таким простым способом.
25. Lyman, "Enrichment Separative Capacity for SILEX," 2-3. (ссылка 13)
26. D. M. Kemp et al., "Uranium Enrichment Technologies in South Africa," Atomic Energy Corporation of South Africa, Ltd. (1991).
27. IAEA, "Communication Received from the Permanent Mission of the Czech Republic to the International Atomic Energy Agency regarding Certain Member States' Guidelines for Transfers of Nuclear-related Dual-use Equipment, Materials, Software and Related Technology," INFCIRC/254/Rev.9/Part 2, November 13, 2013, <http://www.iaea.org/sites/default/files/publications/documents/infcircs/1978/infcirc254r9p2.pdf>.
28. Следует отметить, что точная зависимость термически возбужденных молекул UF_6 неопределенна. Если нежелательное количество молекул останется колебательно возбужденным при температуре, намеченной для облучения, это отрицательно повлияет на селективность. Одним из вариантов может быть сдвиг длины волны лазера для селективного возбуждения димеров при температуре газа, при которой существует значительное количество как мономеров, так и димеров. У возбуждении как мономеров, так и димеров, имеются преимущества и недостат-

- ки, но выбор возбуждения и тех и других может быть более эффективным по энергии по сравнению с центрифугами. Наиболее важно для страны, стремящейся получить ядерное оружие, является то, что такая методика может стать существенным преимуществом для разделительной способности системы третьего поколения.
29. В. Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц, *Fluid Mechanics, 2nd edition* (Butterworth Heinemann, 1987), выражение $T_2/T_1 = \{2\gamma M^2 - (\gamma - 1)\} / \{(\gamma - 1)M^2 + 2\} / (\gamma + 1)^2 M^2$ для газа, испытавшего сжатие ударной волной в политропном процессе, на странице 335, было использовано для расчета T_2/T_1 , т.е. отношение температуры после ударной волны T_2 к температуре до ударной волны T_1 . Для числа Маха $M = 2$ и $\gamma = 1,33$ для SF_6 как газа-носителя G , T_2/T_1 оказалось равным 1,57, или T_2 на 57 процентов выше, чем T_1 . Для ударной волны, проходящей по газу с начальной температурой $T_1 = 100\text{K}$, температура после прохождения ударной волны T_2 будет равна 157 К.
 30. Eerkens, "Laser-induced Migration and Isotope Separation of Epi-Thermal Monomers and Dimers in Supercooled Free Jets," 225-253 (ссылка 11).
 31. Там же, 246.
 32. Eerkens, "Separation of Isotopes by Laser-Assisted Retardation of Condensation (SLARC)," 308. (ссылка 11)
 33. Сообщение по электронной почте от Jeff Eerkens.
 34. Eerkens, "Laser-Induced Migration and Isotope Separation of Epi-Thermal Monomers and Dimers in Supercooled Jets," 246 (ссылка 8).
 35. Т. С. Adamson and J. A. Nichols, "On the Structure of Jets from Highly Under Expanded Nozzles Into Still Air," *Journal of Aerospace Sciences* 23 (1959).
 36. H. W. Liepmann and A. E. Puckett, *Introduction to Aerodynamics of a Compressible Fluid* (John Wiley & Sons, 1947).
 37. Там же.
 38. J. W. Eerkens, "Equilibrium Dimer Concentrations in Gases and Gas Mixtures," *ChemPhysics* 269 (2001):189-241.
 39. В. J. J. Katz and E. Rabinowitch, *The Chemistry of Uranium* (Dover, 1951), давление пара над твердым UF_6 рассчитывалось при помощи выражения $p_e(T) = -132,87 - (344,490/T^2) + 707,31/T + 26,436 \ln T - 0,0387 T$ на странице 407 при $T = 100, 45$, и 25 К.
 40. Eerkens, "Laser-Induced Migration and Isotope Separation of Epi-Thermal Monomers and Dimers in Supercooled Free Jets," 251. (ссылка 11)
 41. R. J. Jensen et al., "Separating Isotopes with Lasers," *Los Alamos Science* 4 (1982).
 42. Eerkens and Kim, "Isotope Separation by Selective Laser-Assisted Repression of Condensation in Supersonic Free Jets," 2333 (ссылка 8).
 43. Диапазон β между 2 и 20 был объявлен Майклом Голдсуорси, исполнительным директором компании Silix Systems Ltd., смотрите ссылку Developing Australia's non-fossil fuel energy industry: Hearing before the Standing Committee on Industry and Resources, Commonwealth of Australia House of Representatives (2006) (statement of Michael Goldsworthy, Chief Executive Officer, Silix Systems Ltd., Sydney, NSW, Australia), <http://www.aph.gov.au/binaries/hansard/reps/commttee/r9041.pdf>.
 44. Пример коэффициента обогащения для газовых центрифуг приведен в: Alexander Glaser, "Characteristics of the Gas Centrifuge for Uranium Enrichment and Their Relevance for Nuclear Weapon Proliferation," *Science & Global Security* 16 (2008): 1-

25. Значения для газовой диффузии приводятся в: Sebastien Philippe, Alexander Glaser, "Nuclear Archaeology for Gaseous Diffusion Enrichment Plants," *Science & Global Security* 22 (2014): 27-49.
45. Lyman, "Enrichment Separative Capacity for SILEX," 5 (ссылка 13).
46. Там же.
47. МАГАТЭ определяет существенное количество как 25 кг урана-235, содержащееся в ВОУ, обогащенном до 20%, или более. Для 90% ВОУ существенное количество будет равно 27,8 кг.
48. На основании плотности природного урана, равной 19,1 г/см³.
49. На основании плотности пара UF₆, $\rho_{UF_6} = 4,291 \cdot 10^2 (P/T)(1 + 1,2328 \cdot 10^4 P/T^3)$ г/см³, где P выражено в кПа. В резервуаре $P = 57,57$ мм рт. ст. = 7,67 кПа, и $T = 300$ К. Из IAEA, *Interim Guidance on the Safe Transport of Uranium Hexafluoride*, IAEA-TECDOC-608, June 1991.
50. Разбавление продукта θ в модели автора немного выше, чем представленное Jeff Eerkens, которое было использовано при расчете разделительной способности и требуемого пространства для системы SIL EX. Автор использовал определение β в уравнении (13), и это привело к большему разбавлению при давлении газа-носителя на сепараторе $p_G = 0,002$ мм рт.ст. Применение $p_G = 0,003$ мм рт.ст. дает $\theta \sim 0,25$, что ближе к модели Eerkens' при $p_G = 0,002$ мм рт.ст. В этом отношении применение модели Eerkens' вместо модели автора приведет к большей площади системы SILEX и меньшей эффективности использования энергии. Однако, реальные рабочие характеристики должны быть измерены экспериментально для прояснения соотношения между давлением газа-носителя на сепараторе p_G и разбавлением θ .
51. A. Glaser, "Characteristics of the Gas Centrifuge for Uranium Enrichment and Their Relevance for Nuclear Weapon Proliferation (corrected)" *Science & Global Security* 16 (2008): 1-25.
52. "Iran develops new generation of centrifuges: AEOI chief," PressTV, September 10, 2014, <http://www.presstv.ir/detail/2014/08/27/376767/iran-develops-ir8-centrifuges/>
53. "Uranium Enrichment," World Nuclear Association, last modified in September 2015, <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Conversion-Enrichment-and-Fabrication/Uranium-Enrichment/>.
54. P. Rabinowitz et al., "Efficient Tunable H2 Raman Laser," *Appl. Phys. Lett.* 35 (1979).
55. G. Yangetal., "HighPowerRepetitiveTEACO2PulseLaser," *LaserPhysics* 22 (2012): 1173-1176.
56. V. P. Singal et al., "A Highly Efficient Electron Beam Controlled Switchless Multi-joule TEACO₂ Laser" *Infrared Physics and Technology* 44 (2003): 69-73.
57. "Two-stage vacuum pump DV0076B-DA," Dekker Vacuum Technologies, Inc., <http://www.dekkervacuum.com/>. Это двухступенчатый насос, который может быть использован как для понижения давления в резервуаре до 57,6 мм рт.ст., так и для намного меньшего давления в камере облучения в 0,005 мм рт.ст.. В документе с его рабочими характеристиками указано, что его всасывающая способность вблизи атмосферного давления равна 68 м³/час, и предполагалось, средняя всасывающая способность при откачивании до давления в резервуаре в 57,6 мм рт.ст. будет примерно такой же.
58. Эта реальная мощность привода равна мощности, требующейся в изотермическом процессе, поделенной на тепловую эффективность в 0,25. Изотермическая

мощность равна $P_s = P_a \cdot S \cdot \ln(P_b/P_a)$, где P_a и P_b – давление на сжатии и давление на всасывании в Паскалях, а S – всасывающая способность в м³/час. Была рассчитана энергия в кВт·час, необходимая для блока разделения длиной в один метр, и поделена на годовую разделительную способность такого блока, равную 257,8 кг·EPP/год.

59. Такой же расчет, как в предыдущем замечании. Единственное различие состоит в том, что всасывающая способность была понижена до 0,5 кубических фута, поскольку камера облучения откачивается до 0,005 мм рт.ст. При длине блока разделения в 35,25 метра эта операция займет менее часа. Ее не надо будет проводить непрерывно во время работы, но энергопотребление будет настолько малым, что этим можно будет пренебречь. И снова рассчитанная изотермическая мощность P_s делится на тепловую эффективность 0,25.
60. В политропном процессе, где при сжатии объема газа увеличиваются как его температура, так и давление, работа, производимая над газом при сжатии от объема и давления V_1 и p_1 до объема и давления V_2 и p_2 , равна

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV = \frac{p_1 V_1^n}{1-n} (V_2^{1-n} - V_1^{1-n}).$$

Индекс политропы n определяется из

условия, что pV^n после сжатия не изменяется. Для блока разделения длиной один метр, работа, произведенная над газом для сжатия постоянного потока от 0,002 мм рт.ст. до 57,57 мм рт.ст. равна всего лишь 0,011 кВт·час в течение одного часа, или 96,36 кВт·час в течение одного года. Для блока с разделительной способностью 257,8 кг·EPP/год энергия будет потребляться со скоростью 0,37 кВт·час/EPP.

61. Нередко сообщалось, что продовольственные магазины в США потребляют около 50 кВт·час электроэнергии в год на квадратный фут площади. Смотрите в: "Buildings Energy Data Book," U. S. Department of Energy, last updated March 2012, <http://buildingsdatabook.eren.doe.gov/CBECS.aspx>.