

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗОВОГО ПОТОКА, ПРОИЗВЕДЕННОГО ВАКУУМНОЙ СИСТЕМОЙ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ БОРА МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО-СЕЛЕКТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ КОНДЕНСАЦИИ

К.А. Ляхов

АННОТАЦИЯ

На основе модели диффузии, управляемой лазерным излучением, были найдены значения температуры и давления, при которых фактор обогащения изотопом бора-10 достигает максимума в сверхзвуковом газовом потоке (2% смесь BCl_3 в Ar). Для производства газового потока с данными параметрами была собрана установка в университете Чеджу (Юж. Корея). Были измерены распределения температуры вдоль оси потока воздуха последовательностью медно-никелевых термопар. На основе полученных данных (недостаточно низкое давление в разделительной ячейке $P=13.4\text{Torr}$ и слишком высокая температура в ядре газового потока $T=10.5\text{C}$) был сделан вывод о необходимости корректировки пропускной способности сопла при использовании турбомолекулярного вакуумного насоса TMP-3403LMEC-T2.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ЛАЗЕРНЫЕ МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ, ИЗОТОПЫ БОРА, ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНЫЙ ВАКУУМНЫЙ НАСОС, ПРИБЛИЖЕНИЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ, УРАВНЕНИЯ БАЛАНСА, СВЕРХЗВУКОВОЙ ПОТОК ПЕРЕОХЛАЖДЕННОГО РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА

SOME PARAMETERS OF VACUUM SYSTEM FOR BORON ISOTOPES SEPARATION BY THE LASER ASSISTED RETARDATION OF CONDENSATION

К.А. Lyakhov

ABSTRACT

Based on the transport model of laser driven diffusion of BCl_3 diluted at high molar fraction $\mu=0.02$ in argon carrier gas in supersonic jets, the values of gas flow core temperature and pressure, corresponding to the maximum of enrichment factor by boron-10, were found. To produce gas flow with optimal for boron isotopes separation parameters, an experimental setup as been assembled in Jeju University (South Korea). The temperature distribution along air flow direction has been measured by the sequence of copper-nickel thermocouples. According to the experimental data, gas flow pressure and temperature obtained are too high (the lowest pressure and temperature are $P=13.4\text{ Torr}$ and $T=10.5\text{ C}$ respectively). It can be explained by mismatch of the nozzle throughput and pumping down rate provided by TMP-3403LMEC-T2 turbomolecular vacuum pump.

KEYWORDS

LASER-ASSISTED METHODS OF ISOTOPE SEPARATION, BORON ISOTOPES, TURBO-MOLECULAR VACUUM PUMP, BOUNDARY LAYER APPROXIMATION, BALANCE EQUATIONS, OVERCOOLED RAREFIED SUPERSONIC GAS FLOW

ВВЕДЕНИЕ

Метод разделения изотопов бора при помощи метода лазерно-селективного торможения конденсации основан на хорошо известном явлении, заключающемся в том,

что более легкие частицы диффундируют к периферии газовой струи быстрее, чем более тяжелые. Следовательно, тяжелые и легкие частицы в конце газового потока могут быть разделены скиммером из-за их различного пространственного распределения. Процесс конденсации в переохлажденном газовом потоке контролируется специальным подбором частоты лазерного излучения для резонансного возбуждения целевых изотопологов и тем самым предотвращения их конденсации, [1]. Необходимость охлаждения газа вызвана еще и тем, что селективность возбуждения тем выше, чем меньше доплеровское уширение линии фото-поглощения. Необходимость в поддержании низкого давления в разделительной ячейке обусловлена тем, что необходимо также уменьшить величину столкновительного уширения линии фотопоглощения для дополнительного повышения селективности возбуждения и для уменьшения скорости потерь уже селективно возбужденных молекул до того как успевают образовываться димеры (для этой же цели во избежание резонансного обмена энергией с нецелевыми изотопологами целевой газ является сильно разбавленным газом носителем). Количественно данный процесс описывается транспортной моделью, предложенной в [2]. Эффективность данного метода разделения была впервые экспериментально продемонстрирована в [3].

Соответствующие специальные условия существуют в ламинарной сверхзвуковой струе с расчётным режимом истечения. Согласно теоретическим оценкам в работе [4], при давлении в разделительной ячейке 10 мТорр, температуре в ядре газового потока 23.7 К и степени разбавления целевого газа газом-носителем ($m=0.02$) фактор обогащения достигает максимального значения (в данном случае в качестве целевого газа был выбран BCl_3 , а в качестве газа-носителя - аргон).

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований (получено распределение температуры) воздушного газового потока, произведенного в специально созданной вакуумной установке.

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗОВОГО ПОТКА

В университете Чеджу (Юж.Корея) была собрана вакуумная установка, схема которой представлена на Рис.1. Давление над соплом в камере смешивания (mixing tank) поддерживалось при помощи компрессора, а скорость натекания и давление в камере контролировались соответственно при помощи степени открытия клапана расходомера (feedthrough valve of flow meter) и манометра. Воздух в камере под соплом откачивался до достижения давления в камере 10 мТорр при помощи турбомолекулярного вакуумного TMP-3403LMC и форвакуумного Edwards XDS-20i насосов (сначала осуществлялась откачка форвакуумным, а затем после достижения некоторого предельного уровня давления турбомолекулярным и форвакуумным соединёнными последовательно). Вход насоса откачивал центральную часть газового потока (периферийная часть газового потока, отсекаемая скиммером, не откачивалась). Затем открывался клапан между камерой смешения и соплом и проводилась регистрация показаний от медь-медно-никелевых T-образных термопар (Cu-Cu/Ni T-type thermocouples).

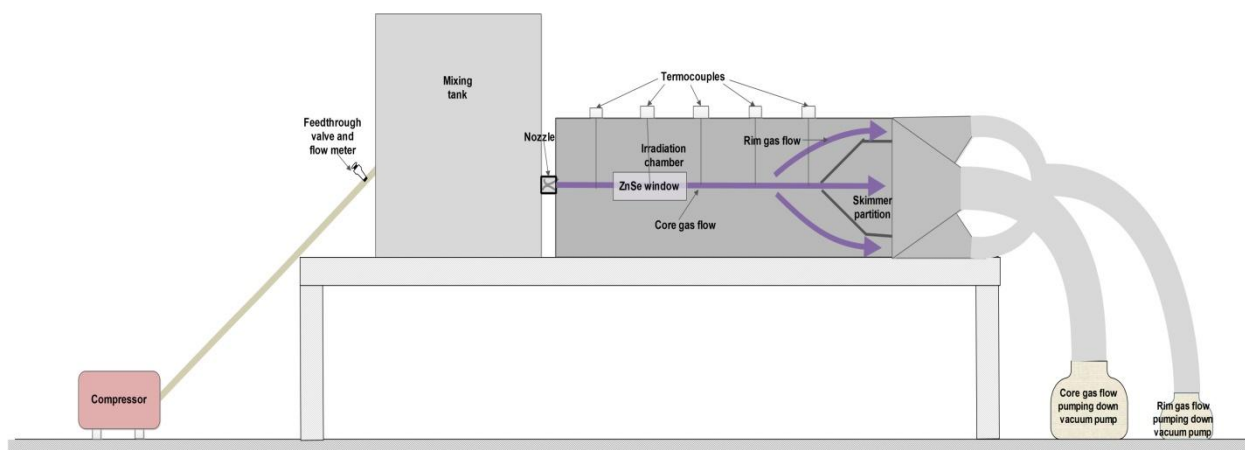


Рис.1: Схема экспериментальной вакуумной установки для разделения изотопов бора

На Рис.2а) представлены результаты измерений температуры вдоль центральной оси газового потока на расстояниях 60 mm, 245 mm, 435 mm, 645 mm, 850 mm от среза сопла, а также в его поперечном сечении на расстоянии 60 mm от среза сопла (точки красного цвета соответствуют значениям на удалении 60 mm от оси, а черного-на оси).

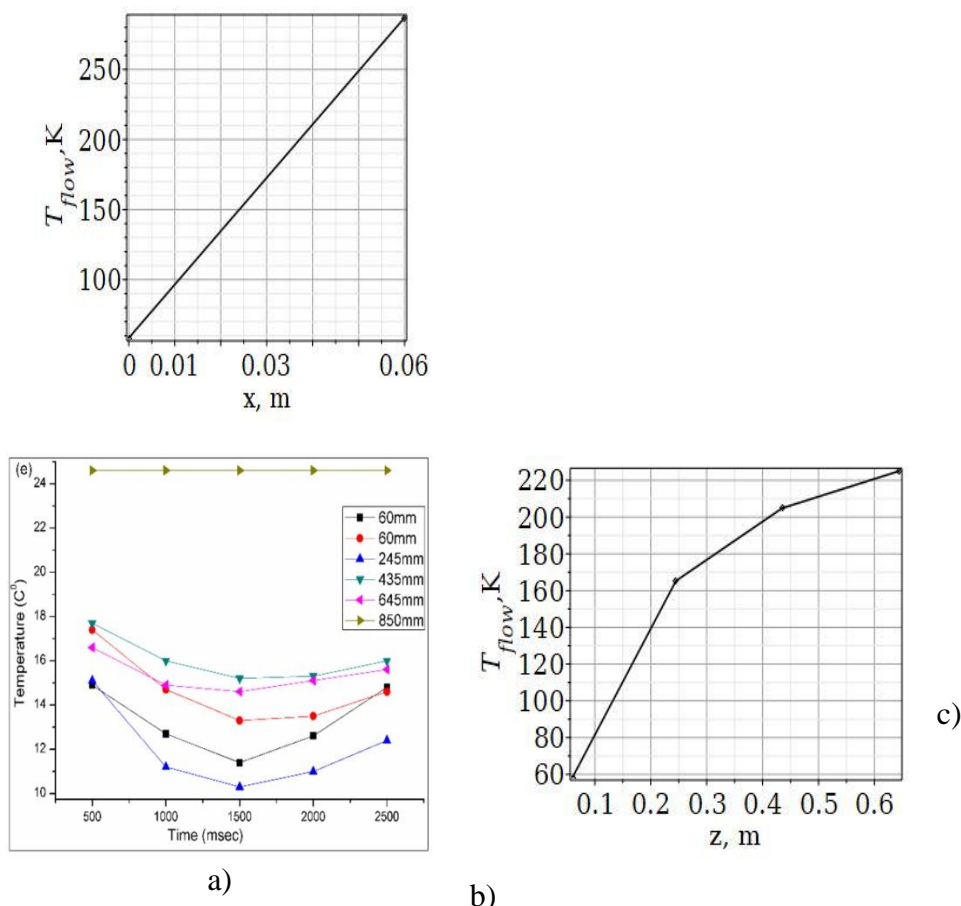
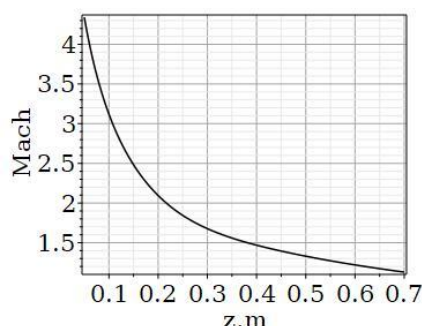


Рис.2: а) Показания термпар при различных удалениях от среза сопла в различные моменты времени при скорости подачи воздуха в камеру смешивания 35 Nl/min (давление в вакуумной камере на входе и выходе из нее составляет 448 Торр и 13.4 Торр соответственно). Вычисленное температурное распределение в невозмущённом газовом потоке б) вдоль и с) поперёк канала на удалении 60 см от среза сопла

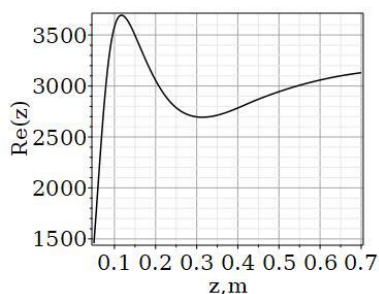
Значения температуры невозмущенного газового потока в точках зондирования $\{(y_i, z_j)\} = \{(0,0.06); (0.06,0.06); (0,0.245); (0,0.435), (0,0.645)\}m$ могут быть оценены по следующей формуле

$$T(y_i, z_j) = \frac{T_{surf}(y_i, z_j)}{1 + \frac{\gamma-1}{2} \phi M^2(y_i, z_j)},$$

где T_{surf} - температура потока газа на поверхности термопар, $\phi \approx \sqrt{Pr}$ - коэффициент восстановления температуры; Pr - число Прандтля, соответствующее невозмущенному потоку газа $Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda}$, где c_p, μ и λ - удельная теплоемкость, вязкость и теплопроводность газа. Изменение числа Прандтля для воздуха в зависимости от температуры показано на Рис. 3а).



a)



b)

c)

Рис.3: а)Изменение числа Прандтля в зависимости от температуры невозмущенного газового потока; б)Изменение числа Рейнольдса в зависимости от расстояния от среза сопла; в) Изменение числа Маха в зависимости от расстояния от среза сопла

Для нахождения распределения числа Маха вдоль канала необходимо ответить на вопрос является ли поток ламинарным или турбулентным. Вычисленное распределение числа Рейнольдса вдоль оси канала

$$\Re(y, z) = \frac{\rho u z}{\mu}, \rho = \frac{P}{k_B T(y, z)}, u = \sqrt{\frac{\gamma R T(y, z)}{M_G}} M(y, z), P = 13.4 Torr$$

представлено на Рис. 3б), из которого видно, что поток становится турбулентным ($\Re > 2300$) на расстояниях от среза сопла больше чем 7-10 см.

Распределение числа Маха может быть представлено в виде

$$M(y, z) = M(0,0) \varphi(y, z),$$

где начальное значение соответствует значению на срезе сопла, которое можно оценить, предположив адиабатичность расширения через сопло:

$$M(0,0) = \sqrt{\frac{2}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P_0}{p_{tot}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]},$$

где P_0 и p_{tot} - давления в верхней и нижней камерах соответственно. Поэтому,

$$T(y, z) = \frac{T_{surf}(y, z)}{1 + \phi \varphi(y, z) \left(\left(\frac{P_0}{p_{tot}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right)}. \quad (1)$$

Начальное число Маха, соответствующее скорости накачки воздуха в камеру смешивания $35 \frac{Nl}{min}$ и перепаду давлений $\frac{P_0}{p_{tot}} = 33,43$ равно $M_0 = 2.97$. Функция $\varphi(x_i)$ вычислялась на основе теории турбулентных струй, изложенной в [5],

$$\varphi(y, z) = \frac{M(y, z)}{M(0,0)} = \sqrt{\frac{T(0,0) b(0)}{T(y, z) b(z)}} F_u(y, z) \sqrt{\frac{\int_0^1 \rho(\xi_0) u^2(\xi_0) d\xi_0}{\int_0^1 F_u^{2-Pr_T}(\xi) d\xi}} \quad (2)$$

Считая сопло хорошо спроектированным, полагаем, что $\int_0^1 \rho(\xi_0) u^2(\xi_0) d\xi_0 = 0.9$

В формуле (2) была учтена связь между отношением температур на оси и периферии с соответствующим отношением скоростей при помощи гипотезы Прандтля для турбулентного трения и теплообмена

$$\frac{T(y, z)}{T(0, z)} = \left(\frac{u(y, z)}{u(0, z)} \right)^{Pr_T}.$$

Турбулентное число Прандтля для плоской струи может быть взято $Pr_T = 0.5$.

Поперечный профиль скорости соответствует модели Шлихтинга

$$F_u(y, z) = \left(1 - \left(\frac{y}{b(z)} \right)^{3/2} \right)^2.$$

Было предположено, что ширина пограничного слоя растёт как

$$b(z) = b(0) + 0.22z,$$

где $b(0)$ соответствует полуширине струи на выходе из сопла.

В выводе (2) была также учтена связь между полем скоростей и температуры в газовом потоке и числом Маха:

$$\frac{u(y, z)}{u(0, z)} = \sqrt{\frac{T(y, z) M(y, z)}{T(0, z) M(0, z)}}.$$

Было предположено, что струя является изобарической.

Температурное распределение в невозмущённом газовом потоке вдоль и поперёк канала представлены получается решением уравнения (1) относительно T . Результаты представлены на Рис. 2b)-c).

Поскольку были использованы приближения для роста толщины струи верные для её среднего течения, вычисленные на начальном участке ($z < 15-20$ см) значения числа Маха и температуры не являются верными.

Была также исследована скорость натекания в данную вакуумную систему. При откачке вакуумной камеры до давления 10 мТорг, давление в ней постепенно повышалось в течении 5 сек. до 0.49 Торг и после этого оставалось на том же уровне при непрерывной работе насосов.

Попытки получить более глубокий вакуум наталкивались на определённые трудности, по-видимому связанные как с большой скоростью натекания извне, так и

слишком большой пропускной способностью сопла. Наилучший результат соответствовал давлению 157 mTorr, достигнутому непрерывной откачкой разделительной ячейки в течении 138 сек. Давление в камере над соплом при этом поддерживалось на уровне 1.01 Torr при помощи полного открытия клапана, перекрывающего канал диаметром 6 см, на другом конце которого поддерживалось атмосферное давление.

ВЫВОДЫ

На основе полученных данных для расширения воздуха (недостаточно низкое давление в разделительной ячейке $P=13.4\text{Torr}$ и слишком высокая температура в ядре газового потока $T=140\text{-}220\text{ K}$) был сделан вывод о сильном влиянии на структуру струи ударной волны, отражённой от периферийной части скиммерного отсека, которая не была подсоединена к соответствующему газовому насосу в данном эксперименте, а также в необходимости уменьшения пропускной способности сопла при использовании турбомолекулярного вакуумного насоса TMP-3403LMES-T2 и форвакуумного насоса Edwards XDS-20i.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lee, Y.T., Isotope separation by photodissociation of van der Waal's molecules, US Patent 4032306, June'28 (1977)
2. Eerkens, J. W., Laser-induced migration and isotope separation of epi-thermal monomers and dimers in supercooled free jets, Laser and Particle Beams 3 225-253 (2005)
3. Zellweger, J. M., Isotopically Selective Condensation and Infrared Laser-Assisted Gas-Dynamic Isotope Separation, Physical Review Letters 52 7 522-525 (1984)
4. K.A. Lyakhov and A.N. Pechen, Some issues of industrial scale boron isotopes separation by the laser assisted retarded condensation (SILARC) method, Separation and Purification Technology 176 402-411 (2017)
5. Г. Н. Абрамович, Прикладная газовая динамика, ч. 1, Издательство Наука, Москва (1991)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ляхов Константин Андреевич – кандидат физико-математических наук (PhD), (ORCID: 0000-0003-2023-5811). Математический институт имени В.А.Стеклова, г.Москва . e-mail:lyakhov2000@yahoo.com