

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ И РАЗМЕРОВ БЛОКА СВЕРХПРОНИЦАЕМЫХ МЕМБРАН НА ОСНОВЕ ВАНАДИЯ С ПЛАЗМЕННОЙ ДИССОЦИАЦИЕЙ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В УСТАНОВКАХ ТИПА ДЕМО-ТИН И ITER

А. В. Жмуровский

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Нижегородская обл.

Работа посвящена оценке возможностей использования сверхпроницаемых мембран на основе ванадия в качестве диффузионных насосов с плазменной диссоциацией изотопов водорода в установках типа ДЕМО-ТИН и ITER. Произведены оценочные расчеты энергоэффективности работы мембранных модулей с плазменной диссоциацией изотопов водорода, а так же их габаритные характеристики. Для сравнительного анализа были проведены расчеты энергоэффективности и габаритных размеров модулей сверхпроницаемых мембран с термической атомизацией. Предложена схема реорганизации топливного цикла в соответствии с включением в нее модулей сверхпроницаемых мембран.

Введение

На данный момент осуществление термоядерного синтеза наиболее перспективно в замкнутых магнитных ловушках для удержания плазмы типа токамак. Полная локализация плазменного шнура в токамаке невозможна, поэтому имеет место распыление стенок камеры «холодной» (пристеночной) плазмой, что приводит к смещению топливного баланса и ухудшению параметров плазмы. Увеличение концентрации гелия в плазме, вследствие реакции синтеза, также влияет на скорость термоядерного синтеза. Поэтому, для поддержания стабильности реакции, необходимо осуществлять непрерывный отвод продуктов реакции из активной зоны. Для этого используется особая конфигурация магнитного поля, отклоняющая низкоэнергетическую плазму в дивертор – устройство служащее для приема потоков частиц с периферии плазменного шнура. Откачиваемая из дивертора смесь газов содержит порядка 90 % дейтерий-тритиевого топлива, которое необходимо отделить от продуктов реакции и распыленных плазмой материалов камеры, для повторного использования в реакторе. В работе [1], для этих целей планируется использовать установки низкотемпературной дистилляции, ресиверы, геттеры, насосы, палладиевые фильтры, системы детритизации воды и системы дополнительной очистки и др., что в совокупности ведет к нежелательному накоплению трития в коммуникациях и функциональных узлах термоядерного реактора, снижению ресурса работы оборудования вследствие водородного охрупчивания, увеличение вовлекаемого в топливный цикл трития.

В связи с этим, авторами [2] было предложено использовать явление сверхпроницаемости для организации короткоциклового сепарации D-T смеси диффузионными мембранными насосами.

Переходные металлы V группы – ванадий, ниобий и тантал, обладают наиболее выгодными свойствами в отношении возможности осуществления сверхпроницаемости для надтепловых водородных частиц при высокой плотности потока (до 10^{19} см⁻²с⁻¹) в широком диапазоне температур (300–2000 °С) и при толщине мембраны вплоть до нескольких мм [2–7]. Однако наиболее перспективным материалом для термоядерных реакторов следует считать ванадий, вследствие его низкой наведенной радиоактивности, меньшей, чем в ниобии и тантале растворимости водорода при более высоком коэффициенте диффузии.

Топливный цикл ТИН

Ранее упоминалось, что внедрение блоков сверхпроницаемых мембран (СПМ) в топливный цикл установок ТИН (термоядерный источник нейтронов) может существенно сократить цикл переработки топлива и удешевить конструкцию.

ТИН – стационарная установка. Следовательно, все системы топливного цикла должны работать в непрерывном режиме и иметь соответствующую производительность, обеспечивать хранение топлива, ввод топлива в термоядерную плазму, откачку продуктов, сепарацию и очистку откачиваемого топлива, дообогащение топливной смеси до заданной концентрации и его хранение.

Данные задачи, с учетом установки в схему топливного цикла блока сверхпроницаемых мембран, реализуются, в соответствии со схемой, рис. 1. Для поддержания термоядерного горения в плазму ТИН инжектируется топливо системами инъекции, а именно, в порядке приоритета, системами пеллет-инъекции, газовыми клапанами и системой инъекции нейтральных атомов. Продукты горения откачиваются из диверторов, вакуумной камеры и системы нейтральной инъекции крионасосами, перед которыми ставится мембранный блок, осуществляющий отделение D/T смеси от гелия и др. примесей в размере 90 % от потока газа. Далее смесь газов, содержащая изотопы водорода, не отделенные в блоке СПМ, направляется в систему очистки, представленную криогенной очисткой, системой каталитического разложения, системой разделения тяжеловодных отходов и геттерным накопителем. Топливная смесь изотопов водорода должна проходить разделение и дообогащение и помещаться в геттерный накопитель, откуда будет подаваться в систему инъекции.

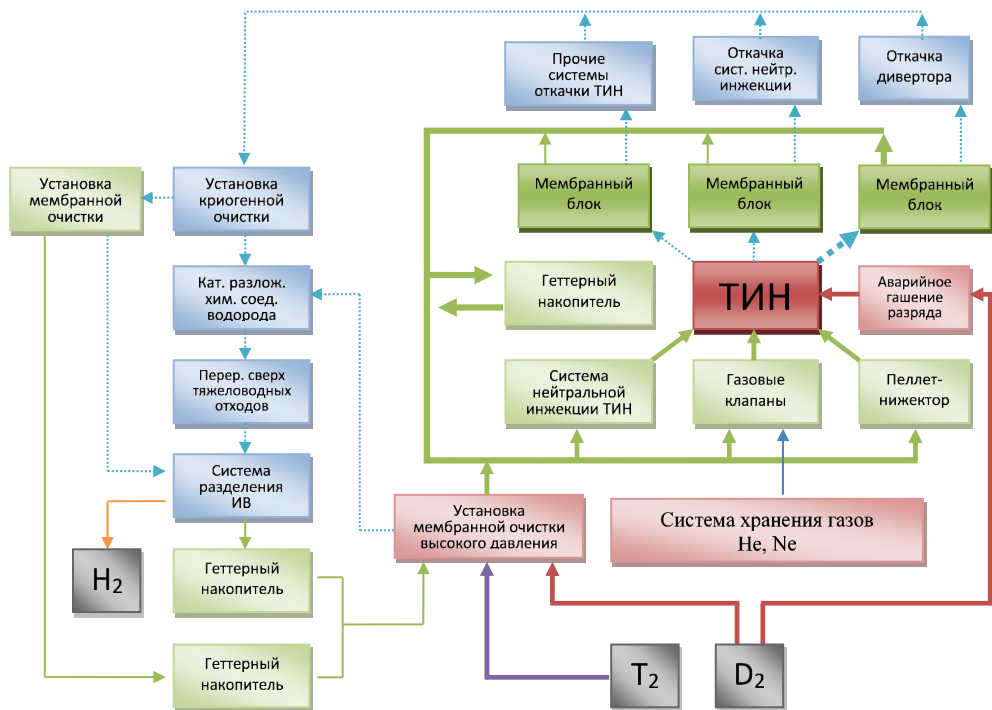


Рис. 1. Модернизированная схема функциональных элементов топливного цикла [1]. Толщина линий указывает на условную величину газового потока. Пунктирные линии указывают на поток многокомпонентного газа. Сплошные линии указывают на поток одноконпонентной газовой смеси

Из рис. 1 видно, что большая часть D/T смеси должна проходить по короткому циклу, а вследствие модульности конструкции ТИН, остальные элементы конструкции очистки и переработки могут быть масштабированы в соответствии с проходящими через них потоками.

ВЧ-разряд

Известны два основных способа возбуждения высокочастотного разряда низкого давления – емкостной и индукционный. Соответственно два вида ВЧ-разряда: Е-разряд и Н-разряд. На рис. 2 изображены типичные способы осуществления индукционного и емкостного ВЧ-разрядов. Н-разряд зажигают при помощи спиралевидного индуктора, внутри которого располагается, как правило, цилиндрическая кварцевая камера, соединенная с вакуумной системой, поддерживающей необходимое давление плазмообразующего газа. Ток высокой частоты пропускается через индуктор. В этом случае силовые линии электрического поля замкнуты внутри газоразрядной плазмы, возбуждающее поле является вихревым. На сегодняшний день существует большое количество различных конструкций ВЧИ- и ВЧЕ-плазмотронов разной мощности, разные способы поджига разряда, различные способы охлаждения разрядных камер ВЧ-плазмотронов, которые позволяют активно использовать ВЧ-плазмотроны в различных технологических процессах [8].

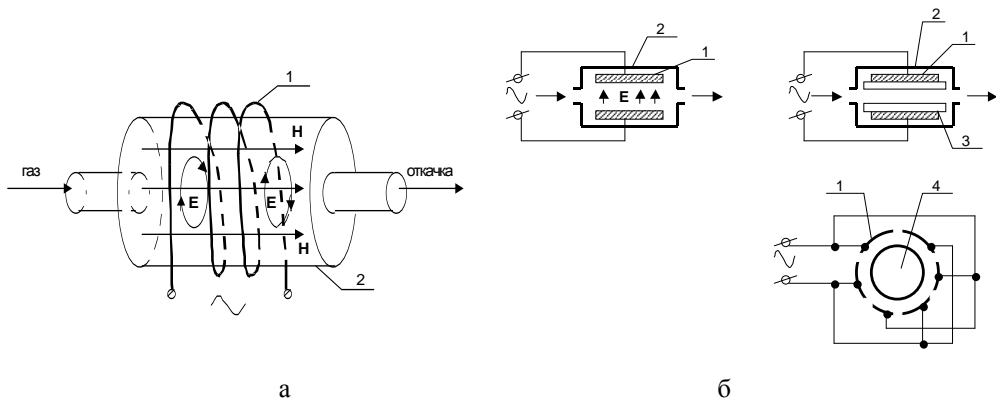


Рис. 2. Способы осуществления ВЧ-разряда низкого давления. а) индукционный разряд: 1 – индуктор, 2 – разрядная камера; б) емкостной разряд: 1 – электроды, 2 – разрядная камера, 3 – диэлектрические пластины, 4 – цилиндрическая кварцевая разрядная камера

При индукционном разряде пробой осуществляется вихревым электрическим полем, напряженность которого, согласно закону электромагнитной индукции, прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока. Отсюда с ростом частоты ВЧ поля растет и напряженность вихревого электрического поля возбуждающего разряд, увеличивается энергия, передаваемая в плазму. При низких частотах индукционный разряд малоэффективен в сравнении с емкостным. С увеличением частоты до десятков и сотен МГц вкладываемая в Н-разряд мощность растет и он становится более эффективным, чем Е-разряд. При аналогичных условиях (одинаковой мощности ВЧ генератора, давлении в разрядной камере) плотность плазмы индукционного разряда, в случае высоких частот, становится более высокой, чем емкостного. Для Е-разряда, вкладываемая мощность с ростом частоты поля уменьшается [9].

Оценочный расчет эффективности СПМ модуля с ВЧ-атомизатором

Использование разряда как генератора надтеплого D/T газа вместо атомизатора в предлагаемой схеме (рис. 1) могло бы дать значительную выгоду по затратам энергии. Основным препятствием для использования плазменного разряда в диверторе ITER было большое количество углеводородов, ожидаемых в выхлопе.

Явное преимущество ВЧ-разряда перед другими видами разрядов заключается в отсутствии горячих катодов. Экспериментальная величина затрат энергии диссоциации водородной молекулы в ВЧ-разряде доходила до значения ~ 15 eV [10].

Ожидаемый поток газа на выходе дивертора ДЕМО – ТИН примерно такой же как и в ITER: $Q = 200$ м³Па/с. Таким образом, принимая величину нормального давления $P_{атм} = 101325$ Па, объем, занимаемый одним молем любого газа при н.у. за $v = 22,4$ л/моль, количество частиц в 1 моль любого вещества

$N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ частиц/моль, рассчитаем количество частиц, проходящих через сечение трубопровода в единицу времени:

$$n = \frac{Q \left[\frac{\text{л} \cdot \text{Па}}{\text{с}} \right] N_A \left[\frac{\text{частиц}}{\text{моль}} \right]}{v \left[\frac{\text{л}}{\text{моль}} \right] P_{\text{атм}} \left[\text{Па} \right]} = \frac{200 \cdot 1000 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{22,4 \cdot 101325} = 5,305 \cdot 10^{22} \frac{\text{частиц}}{\text{с}}. \quad (1)$$

В формуле (1) рассчитано общее количество частиц, включая 5 % содержание гелия в откачиваемой смеси. На самом деле количество газов в смеси несколько больше и зависит от технологических решений, которые будут реализованы в проекте ДЕМО-ТИН.

$$n_{D-T} = n \cdot 0,95 = 0,95 \cdot 5,305 \cdot 10^{22} = 5,04 \cdot 10^{22} \frac{\text{частиц}}{\text{с}}, \quad (2)$$

где n_{D-T} – количество молекул изотопов водорода.

Тогда энергия диссоциации потока водорода будет равной:

$$E = n_{D-T} \cdot e \cdot E_d = 5,04 \cdot 10^{22} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 15 = 120 \text{ кВт},$$

где E_d – энергия, требуемая для диссоциации молекулы водорода в ВЧ-разряде, эВ.

Таким образом необходимо порядка 120 кВт энергии для диссоциации максимума потока D_2/T_2 , который планировался в ITER: 200 Па м³/с. Если предположить эффективность передачи мощности на разряд как ~50 %, то максимальная мощность затрат окажется на уровне ~240 кВт.

Возможность взаимосвязи СПМ с емкостным асимметричным разрядом в ITER была рассчитана А. С. Смирновым [11]. Была предложена геометрия цилиндра с коаксиальными электродами, где СПМ использует внешний заземленный электрод, установленный вдоль стены тракта. Важной особенностью емкостного RF-разряда является высокий отрицательный потенциал электродов относительно плазмы (особенно внутреннего электрода, на который приложена мощность RF). Потенциал электрода тем выше, чем выше плотность RF-мощности.

Это приводит к ограничению плотности RF-мощности и к увеличению размера мембранной системы, если мы хотим ограничивать потенциал электрода приемлемой величиной.

В случае индукционного RF-разряда нет проблемы с потенциалом электрода. Например, плазменный генератор, который используется для производства H⁻ в NBI ASDEX-U (рис. 3) может быть использован как прототип. RF катушка с 6-витками отделена от плазмы кварцевой камерой, которая имеет площадь 32·61 см². Вплоть до 160 кВт RF-мощности при 0,92 МГц тратится на разряд [12]. Экран Фарадея, сделанный из 3 мм толстой меди с вертикальными щелями 3 мм шириной примыкает к боковым стенкам. Таким образом, этот плазменный источник действует при очень высоких плотностях RF-мощности, приложенной к довольно большому объему плазмы и авторы верят, что их плазменный источник может быть масштабирован до любого размера. Присутствие металлического экрана является другой важной особенностью этого плазменного источника, так как мембрана может быть установлена вместо экрана.

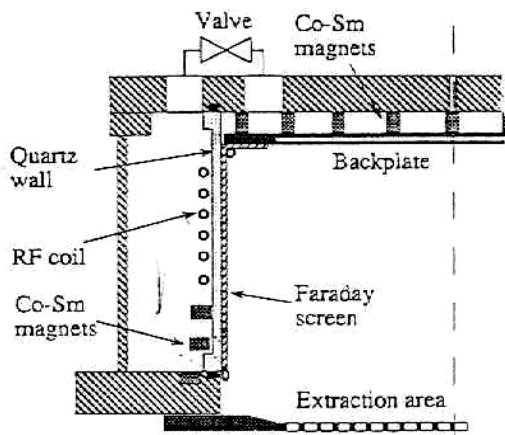


Рис. 3. Эскиз генератора RF плазмы, используемого для получения H в NBI ASDEX-U [13]

Оценочный расчет габаритов СПМ модуля с термической атомизацией

Минимальная площадь мембраны для откачки 90 % D-T смеси:

$$S_{\min} = \frac{0,9(Q - Q_{\text{He}})}{V_{\text{cp}}} = \frac{0,9(200 - 10) \left[\frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}} \right]}{1,4 \left[\frac{\text{мПа}}{\text{с}} \right]} = 122 \text{ м}^2. \quad (3)$$

где Q – общий поток газа, $\frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}}$, Q_{He} – поток гелия, $\frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}}$, V_{cp} – средняя скорость откачки мембраной при усредненном давлении $\frac{\text{мПа}}{\text{с}}$.

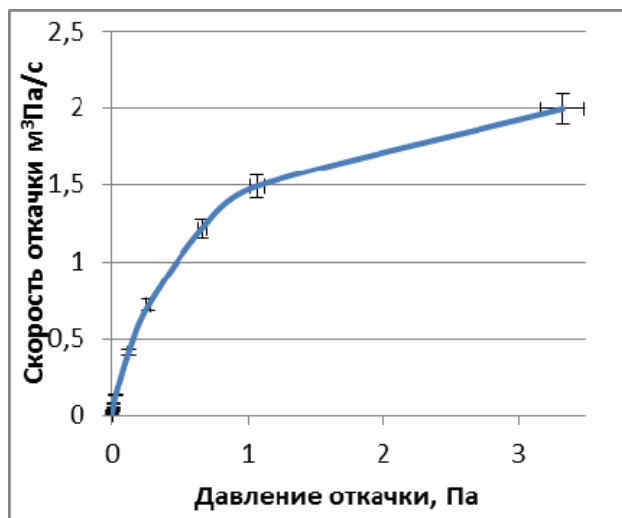


Рис. 4. Зависимость удельной скорости откачки трития ванадиевой мембраной площадью 1 м² от давления, при температуре атомизатора 2100 К и площади атомизатора 0,2 м² [14]

Таким образом, на каждый из четырех откачных трактов придется по $30,5 \text{ м}^2$, что соответствует следующим габаритным размерам одного блока сверхпроницаемых мембран: диаметр 1–1,2 м, длина 4–4,9 м в длину.

Оценочный расчет габаритов СПМ модуля с ВЧ-атомизатором

При использовании ВЧ- разряда в качестве атомизатора можно добиться практически полной атомизации всего падающего потока водорода. В этих условиях скорость мембранной откачки будет определяться уже не скоростью атомизации, а проводимостью самой мембраны, порядка 10^{18} – 10^{19} частиц на см^2 в секунду.

Количество частиц, проходящих через сечение трубопровода в единицу времени составляет, как было подсчитано $5,04 \cdot 10^{22} \frac{\text{частиц}}{\text{с}}$, учитывая, что каждая молекула диссоциирует на два атома, найдем минимальную площадь мембраны для откачки 90 % смеси из общего потока:

$$S = 10^{23}/10^{18} = 10^5 \text{ см}^2 = 10 \text{ м}^2.$$

Данное значение рассчитано для всех четырех откачных трактов, поэтому площадь мембраны в одном откачном тракте составит около $2,5 \text{ м}^2$. При диаметре 1–1,2 м длина мембранного модуля составит порядка 40–50 см.

Таким образом, данная конфигурация СПМ наиболее выгодна как в энергетическом плане, так и в плане компактности.

Оценка энергопотребления и КПД термического атомизатора

В качестве атомизатора рассматривалась танталовая проволока. Оценим ее энергетические потери на излучение при температуре $2100 \text{ }^\circ\text{C}$, при которой достигается наибольший коэффициент атомизации.

$$F = \sigma T_{\text{рад}}^4,$$

где F – энергетическая светимость абсолютно черного тела, T – абсолютная температура абсолютно черного тела, К, σ – постоянная Стефана – Больцмана

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = (5,6698 \pm 0,0011) \cdot 10^{-5} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{град}^{-4},$$

$$T_{\text{рад}} = T \sqrt[4]{\epsilon_T} = 2100 \sqrt[4]{0,25} = 1484,9 \text{ К},$$

где $T_{\text{рад}}$ – радиационная температура тела, ϵ_T – интегральная степень черноты материала,

$$F = \sigma T_{\text{рад}}^4 = 5,6698 \cdot 10^{-5} 1484,9^4 = 2,75 \cdot 10^8 \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} = 27,5 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2},$$

$$P = S \cdot F = 3,4 \text{ МВт},$$

где S – площадь атомизатора, принятая равной 20 % от площади мембраны, м^2 .

Минимальная энергия диссоциации дейтерий-третиевой смеси определяется как:

$$P_{\text{ат}} = E_{\text{ат}} n_{\text{ат}} = 4,54 \cdot 10^{22} \cdot 4,57 = 20,73 \cdot 10^{22} \frac{\text{эВ}}{\text{с}} = 33,2 \text{ кВт},$$

где T_2 -4,59 эВ, D_2 -4,55 эВ, HD -4,51 эВ, HT -4,52 эВ [15],

$$- n_{\text{ат}} = n_{D-T} 0,9 = 0,9 \cdot 5,04 \cdot 10^{22} = 4,54 \cdot 10^{22} \frac{\text{частиц}}{\text{с}},$$

– количество молекул изотопов водорода принимающих участие в атомизации,

n_{D-T} – согласно (1) и (2).

Энергопотребление складывается из энергии диссоциации и тепловых потерь. Как видно, энергия, затрачиваемая на диссоциацию, во много раз меньше потерь энергии на излучение термического атомизатора, поэтому грубо оценивая энергопотребление, можно сказать что оно будет на уровне 3,4 МВт, а КПД составит:

$$\mu = \frac{P_{\text{ат}}}{P} = \frac{33,2}{3400} 100\% = 0,97\%.$$

Таким образом, крайне низкий КПД не позволяет использовать термическую атомизацию для диссоциации больших потоков водорода.

Выводы

Произведенные расчеты габаритных размеров мембран в сверхпроницаемых мембранных блоках показывают, что при использовании плазменной диссоциации потока водорода на выходе из дивертора установок термоядерного синтеза типа ДЕМО-ТИН и ITER возможно снизить площадь мембраны более чем в 10 раз в сравнении с термической атомизацией. При этом, длина мембранного модуля окажется порядка полуметра в длину при диаметре 1 м.

Расчеты энергопотребления и эффективности термического атомизатора так же показывают его неэффективность: при потребляемой мощности 3,4 МВт, КПД не превышает 1 %. В этом плане, 240 кВт для плазменной диссоциации выглядит более перспективно.

Предложена схема реорганизации топливного цикла в соответствии с включением в нее модулей сверхпроницаемых мембран.

Список литературы

1. Ананьев С. С. «Топливный цикл стационарного термоядерного реактора», НИЦ «Курчатовский институт», Программа совещания по проекту ОПГР и ДЕМО-ТИН 17–18 февраля 2014 г., Москва.
2. Livshits A. I., Notkin M. E., Samartsev A. A., J. Nucl. Mater., 170 (1990) 74.
3. Livshits A. I. // Sov. Tech. Phys. Lett. 1977. Vol. 3. P. 236.
4. Livshits A. I. // Vacuum. 1979. Vol. 29. P. 103.
5. Livshits A. I., Notkin M. E., Samartsev A. A., Busnyuk A. O., Doroshin A. Yu., Pistunovich V. I. // Ibid. 1992. Vol. 196–198. P. 159.
6. Livshits A. I., Ohaby N., Bacal M. et al. // Ibid. 1999. Vol. 266–269. P. 1267.

7. Livshits A. I., Ohyaby N. et al. // *Ibid.* 1997. Vol. 241–243. P. 1203.
8. Peters 2002 Internal Versus External RF Coupling into a Volume Source, Paris, 2002.
9. Чернетский А. В. Введение в физику плазмы. – М.: Атомиздат, 1969, 303 с.
10. Peters 2002 Internal Versus External RF Coupling into a Volume Source, Paris, 2002.
11. Smirnov A. S. Discharge Atomizer for ITER exhaust, Technical Proposals, St. Petersburg, 1994.
12. Kraus W., P. Mc Neely, Speth E., Heinemann B., Vollmer O., Wilhelm R. *Rev. Sci. Instr.* 73 (2002) 1096.
13. Kraus W., Feist J.-H., Speth E. Paper presented on the 19th International Symposium on Fusion Technology (SOFT-19), Lisbon, 1998.
14. Писарев А. А., Цветков И. В., Маренков Е. Д., Ярко С. С. // Проницаемость водорода через металлы, Московский инженерно-физический институт, Москва 2008.
15. Таблицы физических величин // Справочник, под ред. акад. И. К. Кирина. М.: Атомиздат, 1976, 1008 с.