

12

©1993 г.

## ОБ ИССЛЕДОВАНИЯХ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРИТИЯ С КОНСТРУКЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Ю.А.Акулов, Н.Н.Аруев

Процессы взаимодействия трития с конструкционными материалами в основном определяют количество трития в цикле реакторов деления и синтеза, уровень его утечек и связанную с этим радиационную опасность для персонала и населения прилегающего региона. В работе показано, что оценки запаса и утечек трития, получаемые путем пересчета параметров взаимодействия трития или дейтерия с материалами на тритий, могут содержать значительные ошибки, и поэтому необходимы прямые исследования на тритии. Предложено для исследования характеристик взаимодействия трития с материалами применять газонаполненные пропорциональные счетчики специальной конструкции, которые обладают высокой чувствительностью. Это позволяет проводить измерения, используя малые количества радиоактивного газа.

1. Исследования по управляемому термоядерному синтезу, проводимые международным научным сообществом уже более 30 лет, подошли к такому рубежу, когда следующим шагом должно быть осуществление реакции синтеза ядер трития и дейтерия  $T(Dn)^4He$ , на которой, как предполагается, будет основана термоядерная энергетика.<sup>1</sup> На наш взгляд, в этой ситуации кроме конструкторских и физических задач по достижению необходимых параметров плазмы, задач, связанных с воздействием нейтронного излучения на конструкционные материалы и образованием долгоживущих радиоизотопов, первостепенную важность приобретают следующие проблемы, касающиеся использования трития: 1) возможность уменьшения до минимума количества трития, находящегося в рабочем цикле термоядерного реактора; 2) возможность уменьшения до минимума утечек и выделения трития в рабочие помещения, атмосферу за счет водородопроницаемости из реактора, blankets, теплоносителя, систем сбора, очистки, хранения трития, коммуникационных сооружений и т.д.; 3) обеспечение безопасной работы научного и технического персонала демонстрационных физических (JET, TFTR, JT-60, T-15 и др.)

<sup>1</sup> 9 ноября 1991 г., когда готовилась эта работа, на установке JET был впервые осуществлен термоядерный синтез на D-T реакции, получена температура  $\sim 2 \cdot 10^8$  град и достигнута пиковая мощность  $\sim 2 \cdot 10^6$  Вт при длительности импульса  $\sim 2$  с. Оценки показывают, что такая мощность выделяется при сгорании всего  $\sim 0.1$  см<sup>3</sup> (норм. усл.) трития, что соответствует  $\sim 0.25$  Ки. Активность напущенного в этом эксперименте в токамак трития, по нашим оценкам, лежит в пределах от 10 до 50 Ки.

и энергетической (ITER) установок; 4) контроль за изменением экологической обстановки в зоне реактора и прилегающем регионе.

Все эти проблемы связаны с тем, что тритий имеет высокую биологическую активность и количества трития, которые будут находиться в цикле термоядерного реактора, значительно превышают количество естественного трития (1.5–3 кг), образующегося в атмосфере в результате ядерных реакций  $^{14}\text{N}(nT)^{12}\text{C}$ ;  $^{14}\text{N}(pT)^{12}\text{N}$ ;  $^{16}\text{O}(pT)^{14}\text{O}$ , или трития, образующегося в результате деятельности человека: взрывов термоядерных бомб, работы атомных станций, радиохимических предприятий и др.

Опасность для персонала и населения, проживающего в прилегающей к реактору области, представляют как загрязнение почвы, воды и воздуха за счет утечек, газовых выбросов, жидких отходов, так и потенциальный запас трития в цикле и возможность возникновения нештатных ситуаций, всевозможные сценарии которых рассматриваются учеными [1].

По оценкам, проведенным разными авторами для международного проекта ITER [1–3], количество трития в цикле будет составлять 4–10 кг, т.е.  $4 - 10 \cdot 10^7 \text{ Ки}^2$  (1 г  $T_2$  соответствует  $\sim 10^4 \text{ Ки}$ ,  $1 \text{ Ки} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ расп./с}$ ). Приведенные оценки могут измениться в несколько раз в связи с возможными изменениями конструкции токамака, выбором материала первой стенки реактора, дивертора, бланкета, коммуникаций, появлением новых данных о реальных температурах и растворимости трития в кандидатных конструкционных материалах.

Например, растворимость трития (или водорода) в карбоновом экране, которым может быть покрыта часть внутренней поверхности первой стенки токамака, существенно зависит от температуры, что в настоящее время на стадии проектирования приводит к большим неопределенностям в оценках тритиевого запаса в экране от 100 г до десятков кг [2,4]. Вероятно, использование больших количеств углеродосодержащих материалов (рекристаллизованных графитов, C–C композитов, углесталлов и др.) в качестве экрана первой стенки токамаков неприемлемо и необходим поиск материалов, в которых тритий растворяется меньше. С этой точки зрения покрытие первой стенки реактора бериллием или бором является более предпочтительным. Однако на исследовательской стадии работы на D–D реакции [5], когда возникает необходимость частой разгерметизации вакуумной камеры, покрытие из бериллия представляет опасность по причине его высокой токсичности. Кроме того, при длительной работе токамака в этом режиме существует вероятность наработки значительных количеств трития в силу первичных  $D(Dp)T$ ,  $D(Dn)^3\text{He}$  и вторичных  $T(Dn)^4\text{He}$ ,  $^9\text{Be}(nT)^7\text{Li}$ ,  $^7\text{Li}(nn\alpha)T$ ,  $^{10}\text{B}(n2\alpha)T$  реакций.

При использовании для термоядерного синтеза реакции  $^3\text{He}(Dp)^4\text{He}$  [6], которая рассматривается как альтернативный вариант T–D реакции и считается более безопасной, так как нейтроны с энергией 14.1 МэВ образуются только в побочной T–D реакции, накопление трития в конструкционных материалах реактора будет определяться теми же механизмами, что и при D–D синтезе. Достоверные оценки количеств образующегося в этих процессах трития в настоящее время вряд ли могут быть сделаны.

<sup>2</sup> В результате аварии на Чернобыльской АЭС выброс долгоживущих радиоактивных веществ составил  $\sim 5 \cdot 10^7 \text{ Ки}$ .

Исходя из имеющихся представлений и данных о водородопроницаемости различных конструкционных материалов и о запасе трития в цикле ITER ( $\sim 10$  кг), можно оценить, что количество выделяющегося трития в виде газов (HT, DT, T<sub>2</sub>) или окисей (HTO, DTO, T<sub>2</sub>O) в помещении термоядерного реактора будет лежать в пределах 10–100 Ки/сут или 0.35–3.5 г/год. Это подтверждается оценками, сделанными в работах [1,7,8]. Более ранние оценки [9] о достаточно низком выделении трития  $\sim 1$  Ки/сут на 1000 МВт вырабатываемой электрической мощности, вероятно, являлись слишком оптимистическими. Известно [10,11], что тритий является одним из основных источников облучения населения вблизи тяжеловодных ядерных реакторов деления и заводов по регенерации и производству ядерного топлива, хотя количество нарабатываемого трития на реакторах этого типа не превышает 60–70 г/год на 1000 МВт, а выделения в окружающую среду в жидких отходах и газовых выбросах составляют 0.4 и 1.6 г трития в год соответственно. Опыт работы атомных электростанций с реакторами различного типа показывает, что в окружающую среду высвобождается от 1 до 10% образующегося трития [10], т.е. трития, находящегося в цикле АЭС. Очевидно, что с учетом полного количества трития в цикле термоядерного реактора подобные уровни утечки недопустимы из-за экологической опасности.

Отметим одно обстоятельство, которое может определять уровень тритиевого заражения как в помещениях реактора, так и в прилегающей местности. Вероятным путем миграции трития является перенос сорбированных молекул и атомов трития на капельках воды и пылинках различного происхождения [10,12], причем газ прочно удерживается на последних длительное время. Этот механизм будет способствовать накоплению трития в местах с затрудненной вентиляцией или развитой шероховатой поверхностью. При запланированных сроках эксплуатации термоядерных установок 15–30 лет [7,13] накапливающийся тритий может представить существенную опасность как для персонала, так и для населения.

2. На наш взгляд, решение проблем, касающихся удержания трития в активной зоне токамака, зонах его воспроизводства и регенерации, коммуникационных трактах термоядерного реактора, а следовательно, и проблем безопасности персонала и населения в значительной степени связано с исследованиями диффузионных свойств существующих конструкционных материалов (под этим мы понимаем измерения проницаемости, растворимости, коэффициента диффузии, энергий активации сорбционных и десорбционных процессов и т.д.), с целенаправленным поиском новых материалов и методами обработки их поверхностей.

Сложность выбора или создания необходимых конструкционных материалов заключается в том, что к ним предъявляются очень жесткие требования по механическим, коррозионным, радиационным, термодинамическим и другим свойствам [4,14,15], которым эти материалы должны удовлетворять одновременно. Как следует из [16], ориентировочное количество образцов различных конструкционных материалов (аустенитных, мартенситных и ферритных нержавеющей сталей, сплавов на основе меди, молибдена, никеля, титана, ниобия, вольфрама, ванадия, керамик, изоляторов и др.), которые должны быть всесторонне исследованы в ближайшие несколько лет, составит десятки тысяч.

Прямые исследования взаимодействия трития с конструктивными материалами до сих пор широко не проводились в силу его малой распространенности ( $< 10^{-10}$  по отношению к протию), опасности, трудности или даже невозможности работы с ним. При исследованиях параметров взаимодействия систем протий (или дейтерий) — металл хорошо согласующиеся между собой результаты дают локальные методы, основанные на эффекте Горского, эффекте Мессбауэра, квазиупругом рассеянии нейтронов. Получаемые этими методами результаты не зависят от поверхностных свойств исследуемых образцов, а определяются только внутренней структурой металлов. Однако эти методы не могут дать надежных результатов для сплавов и неприменимы для систем тритий-металл. Масс-спектрометрические методы измерения дают интегральные характеристики взаимодействия протия (или дейтерия) с металлами или сплавами. При этом на результаты измерений могут влиять способы изготовления мембран из исследуемых материалов, наличие микротрещин и неоднородность структуры материалов, способы очистки мембран от сорбированных активных газов, методики проведения измерений, конструкционные особенности диффузионных ячеек, масс-анализаторов и вакуумных коммуникаций, материалов, из которых изготовлены вакуумные детали и т.д. [17-21]. Исследования с помощью масс-спектрометров систем тритий-металл (сплав) практически невозможны из-за разкого увеличения фоновых токов детекторов, вызываемых  $\beta$ -распадом ядер трития [22,23] и связанных с этим эффектами памяти.

Из-за отсутствия прямых экспериментальных данных о взаимодействии трития с материалами в литературе, посвященной оценкам или утечкам трития из реакторов, часто не проводится различия между изотопами водорода [9,20,24,25] или производится пересчет параметров взаимодействия, полученных для протия и дейтерия, на тритий. Возможность пересчета основывается на том, что получаемые в экспериментах по водородопроницаемости [17,18,21] результаты могут быть представлены зависимостями

$$D = D_0 e^{-\frac{U_D}{RT}}; \quad S = S_0 e^{-\frac{U_S}{RT}}; \quad P = P_0 e^{-\frac{U_P}{RT}},$$

где  $U_D, U_S, U_P$  — энергии активации диффузии, растворимости, проницаемости;  $R$  — газовая постоянная;  $D_0, S_0, P_0$  — соответствующие предэкспоненциальные множители, не зависящие от температуры  $T$  в широком диапазоне ее изменения.

Кроме того, полагается, что выполняется предсказываемое теорией соотношение для коэффициентов, например диффузии изотопов какого-либо элемента  $D_{0_{1i}} : D_{0_{2i}} \simeq \sqrt{m_{2i} : m_{1i}}$ , которое для изотопов водорода означает  $D_{0_H} : D_{0_D} : D_{0_T} \simeq 1 : (1/\sqrt{2}) : (1/\sqrt{3})$ . Однако, в силу того что разность масс изотопов водорода сравнима с самими массами, соотношение обратной изотопической зависимости может не выполняться, так как энергии активации процессов зависят от массы изотопов. Например, в металлах с гранецентрированной кубической решеткой (Ni, Cu) это приводит к тому, что тритий может диффундировать быстрее, чем дейтерий и протий, в интересующем нас диапазоне температур 500° С.

Из вышесказанного следует, что пересчет параметров взаимодействия протия или дейтерия на тритий может вносить существенные ошибки при оценке запаса или утечек трития в конструкционных материалах реак-

торов и, следовательно, необходимы прямые измерения диффузионных параметров трития в этих материалах.

3. Одним из интегральных методов исследования диффузионных параметров конструкционных материалов для ТЯР является метод, в котором для регистрации количеств диффундирующего газа используется явление радиоактивного распада трития. Детектирование  $\beta$ -электронов трития ( $E \approx 5.6$  КэВ,  $E_0 \approx 18.6$  КэВ,  $T_{1/2} \approx 12.3$  лет) широко используется для измерений содержания трития в различных пробах, для радиационного и дозиметрического контроля уровня трития с помощью ионизационных камер, газоразрядных, полупроводниковых и сцинтилляционных счетчиков [10]. Описанию конструкций и характеристик детекторов, а также методик измерения и применения посвящено большое число работ [10, 26, 27]. В ряде работ [28, 29] ионизационные камеры и газоразрядные счетчики использовались для регистрации трития, протиффундировавшего сквозь металлические мембраны. Однако широкого применения для изучения диффузионных свойств конструкционных материалов метод, основанный на явлении радиоактивного распада, не нашел. В то же время по ряду характеристик он значительно превосходит методы, в которых используются нерадиоактивные изотопы водорода. Кроме того, в силу своих конструкционных особенностей (малые объемы, отсутствие массивных металлических деталей вакуумных коммуникаций и т.п.) газонаполненные  $\beta$ -детекторы позволяют избежать ошибок, присущих, например, масс-спектрометрическим методикам.

Для исследований диффузионных свойств трития в конструкционных материалах нами разработаны газонаполненные счетчики, работающие в пропорциональном режиме, которые подобны счетчикам, применявшимся в работах [12, 30], а также сборки из нескольких счетчиков, расположенных друг за другом или один в другом. Внешней вакуумноплотной стенкой первого в сборке счетчика, которая одновременно служит катодом, является исследуемый материал-образец. Другие материалы, которые использованы в счетчиках, — стекла разных марок [31], молибден, вольфрам, золото слабо взаимодействуют с изотопами водорода [9, 14, 15, 21, 23, 32] и не могут существенно влиять на погрешности измерений.

Как показывают исследования, для надежной регистрации событий  $\beta$ -распада трития (отношение сигнала к шуму  $I/B \gtrsim 3$ ) в счетчике цилиндрической формы диаметром 12–15 мм и длиной 60–80 мм должно находиться  $\sim 10^8$  атомов трития. Так как внутренняя поверхность счетчика составляет 30–40 см<sup>2</sup>, то на 1 см<sup>2</sup> площади приходится 2–3  $\cdot 10^6$  атомов трития. Если учесть, что при монослойном покрытии на поверхности материала площадью 1 см<sup>2</sup> находится  $\sim 10^{15}$  адсорбированных атомов водорода (или трития), то чувствительность методики может быть оценена как 2–3  $\cdot 10^{-9}$  монослоя.

В то же время методы, которые позволяют регистрировать водород на поверхности (метод термической “вспышки” и его модификация — метод термодесорбционной спектроскопии [33], метод вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) [34, 35]), обладают чувствительностями  $\sim 10^{-3}$ – $10^{-4}$  монослоя, т.е. на 4–5 порядков ниже чувствительности методики с использованием счетчиков. Очевидным достоинством метода с использованием счетчиков является то обстоятельство, что период полураспада трития не зависит (или зависит очень слабо [36]) от строения

электронных оболочек молекулы, в которую входит атом трития, и, таким образом, любые химические связи атома трития с атомами других веществ в объеме счетчика или на поверхности исследуемого образца не влияют на погрешность измерений. Еще одним достоинством метода является то, что счетчик регистрирует и часть  $\beta$ -электронов, образующихся в приповерхностных слоях толщиной до сотен ангстрем, микро-трещинах и шероховатостях образцов.

Высокая чувствительность методики позволяет проводить исследования диффузионных характеристик конструкционных материалов с низким коэффициентом диффузии и проницаемостью, а также обычных материалов при больших толщинах мембран  $\geq 1$  мм и низких температурах, используя малые количества трития, что недоступно другим методам. Для оценки количеств трития во входной части устройства воспользуемся формулой для установившегося стационарного потока трития  $Q$  сквозь мембрану площадью  $s$  и толщиной  $d$ , которая справедлива для широкого диапазона давлений от сотен до  $10^{-4}$  Тор исследуемых газов [21,37,38],

$$Q = P s \left( \sqrt{P_{\text{вх}}} - \sqrt{P_{\text{вых}}} \right) / d,$$

где  $P$  — проницаемость мембраны (по отношению к тритию), а  $P_{\text{вх}}$  и  $P_{\text{вых}}$  — давления трития на входе и выходе мембраны.

Допустим, что в начальный момент времени парциальное давление трития на выходной стороне устройства  $P_{\text{вых}} = 0$ . Необходимым условием проведения эксперимента является то, чтобы  $P_{\text{вх}}$  было больше  $P_{\text{вых}}$  в течение времени измерений. Принимая во внимание реальные размеры счетчиков, указанные выше,  $d \simeq 1$  мм и величину проницаемости, например, для вольфрама

$$P_W = 1.7 \cdot 10^{-14} \frac{\text{см}^3(\text{норм. усл.}) \cdot \text{мм}}{\text{с} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{Тор}^{1/2}}$$

при  $300^\circ \text{C}$  [39], можно оценить  $P_{\text{вх}} \simeq 10^{-7}$  Тор, что соответствует напуску во входную часть устройства всего  $\sim 10^{11}$  атомов трития. Однако при таких низких давлениях, вероятно, должны быть заметные отклонения от зависимости  $P \sim \sqrt{P_{\text{вх}}}$ . Приемлемым давлением во входной части устройства, по-видимому, может быть  $P_{\text{вх}} \simeq 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-2}$  Тор, при напуске в счетчик  $\sim 0.002 - 1 \text{ мм}^3$  (норм. усл.) трития или 5–2500 мкКи. Кроме того, такое давление соответствует рабочему давлению в камере токамака и знание истинной зависимости проницаемости трития от давления важно при оценке его утечек.

Основные диффузионные характеристики — коэффициент диффузии, растворимость  $S$ , проницаемость  $P$  определяется методом Дайнеса в одном эксперименте путем измерения скорости проникновения газа сквозь мембрану [21,38].

4. Для оценки запаса трития в конструкционных материалах реактора, blanketа, системы сбора и регенерации трития, а также для оценки количеств выделяющегося через стенки камеры токамака и различных коммуникаций трития наибольший интерес, по нашему мнению, представляют исследования материалов, не содержащих металлов из IIIA, IVA и VA групп периодической системы, которые образуют металлические гидриды. Количества водорода, поглощаемые металлами Ti, Zr, V, Ta,

Nb из этих групп, а также сплавами на их основе [29], могут быть очень велики и составлять несколько атомов водорода (или трития) на атом металла, причем процесс образования гидридов является экзотермическим [40]. В эндотермических системах атомное отношение водород-металл обычно меньше  $10^{-3}$  даже при высоких температурах. Поэтому при выборе конструкционных материалов для ТЯР или реакторов деления с целью уменьшения в них запаса трития, вероятно, более предпочтительными являются металлы (или сплавы на их основе), растворяющие водород без образования гидридов, — Fe, Co, Mo, Ag, W, а также Cu, Cr, Ni, у которых реакция образования гидридов является эндотермической. Возможным кандидатным материалом является также Al, который образует соединения, промежуточные по свойствам между ионными и ковалентными гидридами. По крайней мере алитирование (термодиффузионное покрытие алюминием) сталей приводит к уменьшению водородопроницаемости последних [39].

Таким образом, исследования диффузионных характеристик трития в конструкционных материалах на основе Fe, Ni, Cr, Mo, W, а также материалов, покрытых Cu, Ag (плакировка), Al (алитирование), эмалями, стеклом, термостойкими лаками, и получение надежных численных данных по растворимости и проницаемости трития с помощью газонаполненных счетчиков могут помочь в решении проблемы выбора кандидатных материалов для различных систем ТЯР и реакторов деления.

### Список литературы

- [1] ITER Documentation series N 36. ITER Safety Analysis/Ed. J. Raeder, S.Piet. 1990.
- [2] Shuk M.V., Pistunovich V.V., Altovskij J.V. Influence of Some Energy Parameters on the Inventory of Tritium in the Graphite Screen of the First Wall of ITER. ITER-IL-SA-4-9-99.
- [3] Ершова З.В., Капышев В.К. // V Всесоюз. конф. по ИПТЯР. Л., 1990. С. 242.
- [4] ITER Documentation series N 30. ITER Plasma Facing Components / Ed. T. Kuroda, G. Vieider. Vienna: Intern. Atomic Agency, 1990.
- [5] Bell A.C., Campbell J., Gordon C. et al. Preprint. N JET-P(88)61. 1988.
- [6] Головин И.Н. // Физика плазмы. 1990. Т. 16. № 12. С. 1397–1409.
- [7] Ершова З.В., Виноградова Н.К., Евграфов Д.И. // Докл. II Всесоюз. конф. по инженерным проблемам термоядерных реакторов (ИПТЯР). Л., 1981. Т. 2. С. 278–283.
- [8] Никифоров А.С., Ершова З.В., Виноградова Н.К. и др. // Конструкционные материалы для реакторов термоядерного синтеза. М.: Наука, 1988. С. 28–33.
- [9] Maroni V.A., van Deventer E.H. // J. Nucl. Mater. 1979. Vol. 85/86. P. 257–269.
- [10] Балонев М.И. Дозиметрия и нормирование трития. М.: Энергоатомиздат, 1983. 150 с.
- [11] Радиация. Дозы, эффекты, риск / Под ред. Ю.А.Банникова. Пер. с англ. М.: Мир, 1990.
- [12] Мамырин Б.А., Акулов Ю.А., Хабарин Л.В., Юденич В.С. // ЖТФ. 1983. Т. 53. Вып. 6. С. 1139–1142.
- [13] ITER Documentation series N 35. ITER Plant Systems. Vienna: Intern. Atomic Agency, 1990.
- [14] Альтовский И.В., Глузих В.А., Горынин И.В. и др. // Конструкционные материалы для реакторов термоядерного синтеза. М.: Наука, 1988. С. 32–40.
- [15] Кадомцев Б.Б., Орлов В.В., Шаталов Г.Е. и др. // Конструкционные материалы для реакторов термоядерного синтеза. М.: Наука, 1988. С. 3–25.
- [16] ITER Documentation Series N 24. ITER Test Program / Ed. M.Tillack. Vienna: Intern. Atomic Energy Agency, 1990.
- [17] Беляков Ю.И., Ионос Н.И. // ЖТФ. 1961. Т. 31. Вып. 2. С. 204–210.
- [18] Компаниец Т.Н., Куракин В.А., Курдюмов А.А., Лясников В.Н. // ФТТ. 1978. Т. 20. Вып. 12. С. 3533–3538.
- [19] Лившиц А.И., Самарцев А.А. // ЖТФ. 1979. Т. 49. Вып. 11. С. 2433–2436.
- [20] Взаимодействие водорода с металлами / Под ред. А.П.Захарова. М.: Наука, 1987. 296 с.

- [21] *Компаниец Т.Н., Курдюмов А.А., Лясников В.Н.* // *Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. Вып. 1(694).* М., 1980. 84 с.
- [22] *Аруев Н.Н., Байдаков Е.Л., Мамырин Б.А.* // *ЖФТ.* 1987. Т. 57. Вып. 2. С. 300-305.
- [23] *Malinowski M.E.* Tritium Caused Background Current in Electron Multipliers. SAND 79-8218. Sandia Laboratories (Livermore), 1979.
- [24] *Мартыненко Ю.В., Явлинский Ю.Н.* Препринт ИАЭ. № 3767/8. М., 1983.
- [25] *Полосухин Б.Г., Баскаков Е.И., Сулимов Е.М. и др.* // *Атомная энергия.* 1990. Т. 69. № 5. С. 333-334.
- [26] *Методы измерения трития / Под ред. Ю.В.Сивинцева.* Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1978. 96 с.
- [27] *Малышев Е.К., Засадыч Ю.Б., Стабровский С.А.* Газоразрядные детекторы для контроля ядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1991. 156 с.
- [28] *Sicking C., Buchold H.* // *Zeitschrift fur Naturforschung.* 1971. В. 26А. N 12. P. 1973-1980.
- [29] *Виноградова Н.К., Ершова З.В.* // *Докл. Всесоюз. конф. по ИПТЯР.* Л., 1977. Т. 2. С. 263-271.
- [30] *Мамырин Б.А., Акулов Ю.А., Хабарин Л.В., Юденич В.С.* // *ПТЭ.* 1982. № 2. С. 151-152.
- [31] *Любимов М.Л.* Спаи металла со стеклом. М.: Энергия, 1968. 280 с.
- [32] *Водород в металлах / Под ред. Г.Алефельда, И.М.Фелькля.* М.: Мир, 1981.
- [33] *Агеев В.Н.* // *Поверхность. Физика, химия, механика.* 1984. Т. 3. С. 5-26.
- [34] *Werner H.W., Garten R.P.H.* // *Rep. of Progress in Phys.* 1984. Vol. 47. N 3. P. 221-344.
- [35] *Вудраф В., Делчар Т.* Современные методы исследования поверхности. М.: Мир, 1989. 568 с.
- [36] *Budick B.* // *Phys. Rev. Lett.* 1983. Vol. 75. № 12. P. 1034-1037.
- [37] *Латышев В.В.* // *Атомная энергия.* 1990. Т. 68. № 1. С. 38-44.
- [38] *Daynes H.* // *Proc. Roy. Soc.* 1920. Vol. 97A. N 685. P. 286-307.
- [39] *Виноградова Н.К., Ершова З.В., Никифоров А.С., Старшин Е.П.* // *Докл. II Всесоюз. конф. по ИПТЯР.* Т. 4. Л., 1981. С. 290-298.
- [40] *Робертс М., Макки Ч.* Химия поверхности раздела металл-газ. М.: Мир, 1981. 538 с.

Физико-технический институт  
им. А.Ф.Иоффе РАН  
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию  
27 февраля 1992 г.  
В окончательной редакции  
19 июня 1992 г.