

УДК 541.127

О МЕХАНИЗМАХ РЕКОМБИНАЦИИ АТОМОВ КИСЛОРОДА И АЗОТА НА КВАРЦЕ

© 2019 г. Б. Е. Жестков^{1, *}, С. Н. Козлов^{2, **}, Е. Н. Александров²¹Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский, Россия²Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, Москва, Россия

*E-mail: bzhestkov@mail.ru

**E-mail: kozlovse@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.07.2018 г.

После доработки 10.10.2018 г.

Принята к публикации 25.12.2018 г.

Рассмотрена гетерогенная рекомбинация атомов азота и кислорода. Описана установка и методика определения вероятности гетерогенной рекомбинации атомов O и N с помощью резонансно-флуоресцентной спектроскопии в строго контролируемых условиях. Изучено изменение вероятности рекомбинации атомов азота и кислорода на поверхности кварца в диапазоне температур 297–1000 К и давлений 0.01–10 мбар. Выделены области давлений и температур, где рекомбинация происходит преимущественно по схеме Ленгмюра–Хиншельвуда или по схеме Или–Ридила. Приведены данные по энергии активации рекомбинации. Показано, что рекомбинация атомов азота и кислорода в основном происходит на различных активных центрах.

DOI: 10.1134/S0040364419030219

ВВЕДЕНИЕ

Исследование каталитических свойств материалов представляет значительный фундаментальный и практический интерес. Гетерогенная рекомбинация атомов является одним из основных элементарных процессов при взаимодействии плазмы с поверхностью и играет важную роль в ряде химических технологий, теплообмене гиперзвуковых летательных аппаратов [1–8]. Рекомбинация на поверхности аппарата атомов, образовавшихся в сильной головной ударной волне, может приводить к значительному увеличению теплового потока (до четырех раз) [6]. Использование на аэрокосмических аппаратах материалов с низкой каталитической активностью позволяет существенно снизить тепловой поток. В связи с этим исследования рекомбинации атомов кислорода и азота на кварце особо интересны, так как низкая каталитическая активность существующих теплозащитных материалов объясняется образованием поверхностной пленки SiO₂. Например, ликвидация пленки SiO₂ при температуре поверхности ~2000 К делает высокотемпературное покрытие каталитическим [6]. Есть ряд работ, посвященных моделям рекомбинации атомов кислорода и азота на кварце [9–13], но в них рассматриваются идеализированные схемы.

Прямые измерения вероятности гетерогенной рекомбинации атомов O и N интенсивно проводились с середины XX века. Несколько работ [2–5]

вышло в последние годы. Что весьма важно, в данных работах приняты специальные меры по очистке поверхности и измерению вероятности гетерогенной рекомбинации γ -атомов в строго контролируемых условиях.

Однако имеющиеся данные о γ все еще весьма ограничены и велик их разброс, связанный в основном с отличиями в условиях экспериментов. Недостаточно изучены зависимости вероятности рекомбинации атомов азота и кислорода от температуры и давления, не уделено внимание влиянию адсорбционных слоев, не удавалось разделить процессы рекомбинации по механизмам Ленгмюра–Хиншельвуда и Или–Ридила [1]. Разброс данных затрудняет разработку численных моделей теплообмена.

Целью работы является выяснение механизмов рекомбинации атомов кислорода и азота на кварце. Исследованы зависимости вероятности рекомбинации атомов N и O от давления и температуры. Эксперименты выполнены при низких давлениях в смесях с гелием. В этих условиях влияние адсорбционных слоев существенно меньше и можно было ожидать, что будет преобладать тот или иной механизм рекомбинации.

УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для измерения вероятности гетерогенной рекомбинации γ -атомов в ИБХФ РАН создана экс-

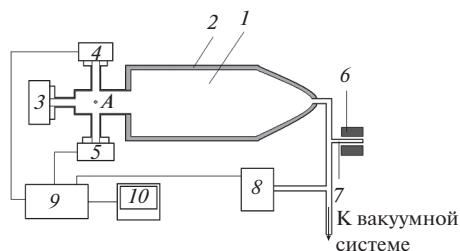


Рис. 1. Установка для измерения вероятности гетерогенной рекомбинации атомов: 1 – кварцевый реактор; 2 – печь; 3 – источник резонансного излучения; 4, 5 – приемники резонансного излучения; 6 – СВЧ-резонатор, обеспечивающий диссоциацию газа в кварцевом отростке 7; 8 – датчик давления; 9 – электронная система обработки сигналов; 10 – компьютер.

периментальная установка с двумя каналами регистрации концентраций атомов [2] методом резонансно-флуоресцентной спектроскопии (РФС) [8, 14]. Вероятность гетерогенной рекомбинации γ -атомов определяется по спаду концентрации атомов при их рекомбинации на стенках реактора в строго контролируемых условиях. Схема установки представлена на рис. 1. Использовался цилиндрический кварцевый реактор диаметром 50 мм и длиной $L = 175$ мм. Диссоциация молекул азота и кислорода происходит в отростке 7 в СВЧ-разряде. Образовавшиеся атомы диффундируют в реактор, где постепенно превращаются в молекулы в результате гетерогенной рекомбинации на стенках. Для возбуждения резонансной флуоресценции используется излучение СВЧ разрядной лампы, подключенной к генератору Луч-2. Спектр лампы в диапазоне 115–140 нм содержит только линии N (120 нм), N_α (121.6 нм), O (130.2–130.5 нм) [8]. Излучение лампы возбуждает резонансные переходы атомов.

Резонансные состояния атомов изотропно излучаются за $\sim 10^{-8}$ с. Поток света, возбуждающий резонансные переходы, тщательно коллимировался и по выходе из реакционной зоны улавливался рогом Вуда. Фотодетекторы располагались перпендикулярно к направлению возбуждающего излучения. Удалось выполнить относительные измерения спада концентрации частиц в реакторе с погрешностью не выше 15%. Отметим, что влияние процессов диффузии, объемных реакций рекомбинации и гетерогенных реакций диссоциации на измерения вероятности рекомбинации атомов при рассматриваемых рабочих давлениях и температурах не существенно. Регистрация резонансного излучения осуществлялась счетчиком фотонов типа Гейгера-Мюллера в режиме пропорционального счета, соответствующего напряжению на электродах 1050–1250 в [15]. Длинноволновая граница регистрируемого излучения определяется потенциалом ионизации газа-на-

полнителя счетчика, а коротковолновая – областью пропускания приемного окна. Квантовая эффективность счетчиков в используемой области вакуумного ультрафиолета достигает значений 0.2 импульс/фотон [16]. Эффективная область спектральной чувствительности составляет 113–120.5 нм (азотный счетчик) и 125–134.5 нм (кислородный). В зависимости от длины оптического пути удастся реализовать линейную зависимость между интенсивностью сигнала РФС и концентрацией атомов в широком диапазоне от 10^7 до 10^{14} частиц/см⁻³ [14].

Реактор целиком выполнен из кварца. Снаружи на реакторе располагается нагреватель. Для генерации атомов в кварцевом отростке 7 и для возбуждения разряда в лампе 3 использовались СВЧ-резонаторы Бройда. Место регистрации атомов с помощью РФС обозначено точкой А на рис. 1. Для счета фотонов использовалась специально созданная электронная система, более компактная, чем стандартные системы [17].

Вакуумные уплотнения окна для ввода зондирующего излучения лампы 3 и окон счетчиков фотонов 4, 5 изготовлены из тефлона, а сами окна выполнены из MgF_2 и CaF_2 . Давление в реакторе регистрируется манометром Baratron чувствительностью 0.1 Па. Рабочие смеси для реактора и резонансной лампы составлялись из очищенных (99.99) кислорода и азота, а также особо чистого (99.999) гелия. С вакуумной системой реактор соединяется стеклянными кранами с тефлоновыми уплотнителями и стеклянными ловушками, помещенными в жидкий азот. Атомы в реакторе контактируют только с материалами (кварц, стекло, тефлон, MgF_2 , CaF_2), вероятность рекомбинации на которых мала, причем 96% всей поверхности составляет кварц. Для очистки стенок реактора от загрязнений поверхность реактора обрабатывалась плавиковой кислотой (HF), затем многократно дистиллированной водой. Кроме того, реактор перед каждой серией экспериментов очищался под воздействием потоков атомов O и N с концентрациями 10^{14} – 10^{15} см⁻³, а также ионов и излучения СВЧ-разряда в течение 4 ч. Очистка позволяла надежно удалить воду, адсорбированную на стенках, а также другие загрязнения и приводила к уменьшению определяемых значений γ в 1.5–2 раза.

Вероятность рекомбинации атомов в основном реакторе определялась при 650 К и ниже с тем, чтобы характерное время жизни атомов, уменьшающееся с увеличением температуры, было много больше постоянной времени регистрирующей системы. Ряд измерений вероятности рекомбинации атомов на кварце был выполнен при температурах до 1000 К в другом подобном реакторе несколько иной конструкции. Эксперимент в основном реакторе проводился следующим об-

разом. В охлажденном до 650 К реакторе устанавливалось заданное давление рабочих смесей и на некоторое время включался СВЧ-разряд. Позже разряд в резонаторе для генерации атомов выключался, регистрировалась убыль атомов в реакторе, и затем определялась вероятность гетерогенной рекомбинации атомов. При постепенном понижении температуры реактора выполнялись 5–8 измерений при разных температурах. Регистрация атомов начиналась с концентрации $n_0 = 10^{12} \text{ см}^{-3}$ с тем, чтобы исключить влияние самообращения и иметь стандартные начальные условия. На рис. 2 представлены примеры регистрации концентраций атомов азота и кислорода при разных температурах.

После выключения СВЧ-генератора концентрация атомов n в реакторе спадает по экспоненциальному закону

$$n/p = n_0/p \exp(-a\gamma t). \quad (1)$$

Для рассматриваемого реактора в виде удлиненного цилиндра ($d/2L = 0.14$), $a = 1.14c/d$, где c – средняя тепловая скорость атомов $c = (8kT/\pi m_i)^{1/2}$; d, L – диаметр и длина реактора. Исследуется влияние давления в реакторе p на процессы рекомбинации, поэтому в качестве относительной концентрации атомов рассматривается величина n/p . Расчеты [3] рекомбинации в схематизированном реакторе и длинном цилиндре ($d/2L = 0.05$) методом прямого статистического моделирования показали, что рекомбинацию на стенках использовавшегося реактора можно рассчитывать по формуле (1) при $a = 1.14c/d$ с погрешностью не выше 5%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные о зависимости γ от давления в реакторе и температуры представлены на рис. 3–7. Измеренные значения вероятности рекомбинации атомов N и O при комнатной температуре $\gamma_O \approx \gamma_N \sim 10^{-4}$ согласуются с результатами работ [2–5], где были приняты специальные меры по очистке поверхности кварца и стекол, на которых исследовалась рекомбинация атомов. В области низких давлений $p = 0.01–0.5$ мбар наблюдаются максимумы зависимостей вероятности рекомбинации γ -атомов N и O от давления. При давлениях $p \geq 2$ мбар значения вероятности рекомбинации стабилизируются.

Отметим, что кажущийся рост γ с увеличением давления в некоторых измерениях на рис. 4 связан с образованием озона O_3 . Образование молекул озона приводит к дополнительному уменьшению концентрации атомов кислорода.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 4–7, позволяет сделать вывод о протекании

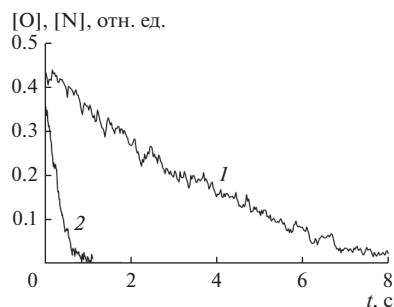


Рис. 2. Типичные кинетические кривые убыли атомов в реакторе: 1 – N при 313 К, 2 – O, 660 К.

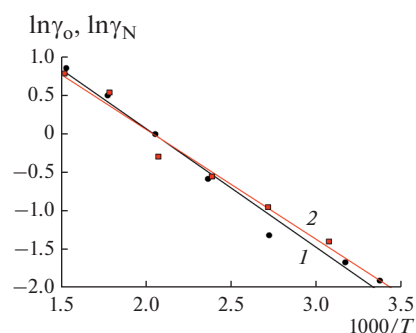


Рис. 3. Температурные зависимости вероятности рекомбинации в арениусовском виде для атомарного азота и кислорода: 1 – 20% N₂ в He, 2 – 1% O₂ в He.

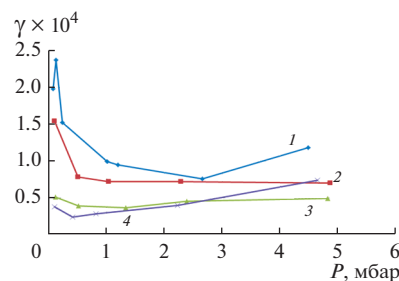


Рис. 4. Зависимость γ -атомов кислорода от давления в смеси 10% O₂ + 90% He при: 1 – 650 К, 2 – 564, 3 – 476, 4 – 417.

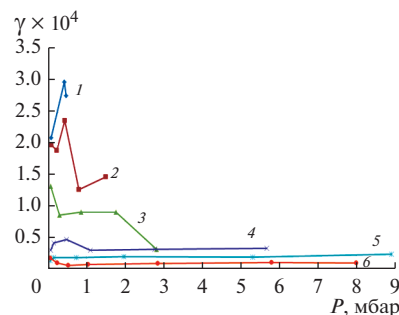


Рис. 5. Зависимость γ -атомов частично диссоциированного N₂ от давления при: 1 – 658 К, 2 – 569, 3 – 496, 4 – 433, 5 – 380, 6 – 300.

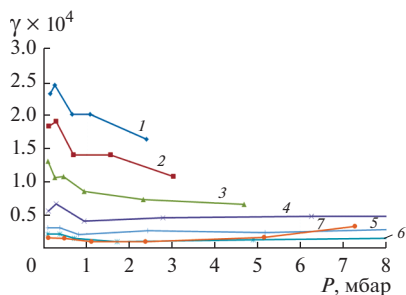


Рис. 6. Зависимость γ -атомов N от давления в смеси 20% N_2 + 80% He при: 1 – 655 К, 2 – 565, 3 – 488, 4 – 424, 5 – 368, 6 – 316, 7 – 297.

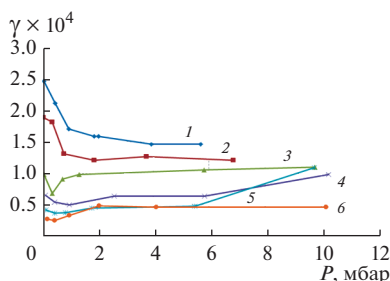


Рис. 7. Зависимость γ -атомов O от давления в смеси 1% O_2 + 99% He при: 1 – 660 К, 2 – 562, 3 – 484, 4 – 420, 5 – 369, 6 – 328.

реакции рекомбинации преимущественно по схеме Ленгмюра–Хиншельвуда в области $p = 0.01$ –1 мбар и по схеме Или–Ридила при $p \geq 3$ мбар.

Как известно, гетерогенная рекомбинация происходит [1]: 1) по схеме Ленгмюра–Хиншельвуда, когда рекомбинируют 2 атома, адсорбированные на поверхности, $(A - S) + (A - S) \rightarrow A_2 + S$; 2) по схеме Или–Ридила когда атом газовой фазы рекомбинирует с атомом, адсорбированным на поверхности, $A + (A - S) \rightarrow A_2 + S$.

Рассмотрим реакцию рекомбинации по схеме Ленгмюра–Хиншельвуда. Она имеет нулевой порядок по отношению к относительной концентрации атомов n/p , т.е. скорость реакции не зависит от n/p . Учитывая, что концентрация атомов в реакторе падает со временем t по экспоненциальному закону (1) и каждое измерение проводится при одной и той же начальной концентрации атомов $n_0 = 10^{12}$, получаем

$$d(n/p)/dt = (a\gamma n_0/p)\exp(-a\gamma t) = a\gamma n/p \approx K,$$

$$\text{т.е. } \gamma \approx pK/an \sim p/n \sim p/n_0 \sim p.$$

Это и имеет место при увеличении давления от 0.01 до 0.05 мбар (рис. 4, 5). Кроме того, видно, что на всех рис. 4–7 при высоких T (≥ 500 К) значения вероятности рекомбинации для самых низ-

ких значений $p = 0.01$ –0.05 мбар значительно выше, чем при $p \geq 3$ мбар.

По-видимому, благодаря высокой подвижности адсорбированных атомов на поверхности, практически свободной от адсорбированных молекул и атомов, рекомбинация происходит преимущественно по схеме Ленгмюра–Хиншельвуда.

Вклад рекомбинации по схеме Ленгмюра–Хиншельвуда постепенно уменьшается при повышении давления до 0.5–3 мбар. Снижение γ при уменьшении вклада рекомбинации по схеме Ленгмюра–Хиншельвуда происходит как $\sim 1/p$ (верхние кривые на рис. 6, 7). Можно считать, что при $p = 0.01$ –1 мбар преобладает реакция по модели Ленгмюра–Хиншельвуда. Отметим, что небольшое количество измерений, выполненных при высоких температурах, на рис. 4–7 связано с недостаточно высоким качеством кварца реактора. Из-за гибели атомов при диффузии по реактору на пути к месту регистрации не удается получить требуемой концентрации атомов $n_0 = 10^{12}$ при высоких температурах при повышении давления в реакторе.

Для участков экспериментальных зависимостей γ от давления с $p > 3$ мбар (рис. 4–7) картина другая. Вероятность рекомбинации γ не зависит от давления. Это свидетельствует о том, что при этих давлениях рекомбинация идет по схеме Или–Ридила. Действительно, реакция рекомбинации по схеме Или–Ридила имеет первый порядок по отношению к n/p , т.е. скорость реакции $d(n/p)/dt$ пропорциональна n/p :

$$d(n/p)/dt = (a\gamma n_0/p)\exp(-a\gamma t) = a\gamma n/p \sim n/p.$$

Отсюда получаем $\gamma \sim 1/a = \text{const}$, что наблюдается в эксперименте (рис. 4–7). В [2, 3, 8] также наблюдалось, что γ не зависит от давления в реакторе при давлениях в диапазоне 3–10 мбар и температурах 293–1000 К, т.е. рекомбинация при этих условиях идет по схеме Или–Ридила.

Таким образом, для рекомбинации атомов N и O на кварце при 300–1000 К имеют место области преимущественной рекомбинации по схемам Ленгмюра–Хиншельвуда (0.01–1 мбар) и Или–Ридила (3–10 мбар).

В используемом реакторе имеются каналы регистрации концентраций атомов азота и кислорода. С целью выяснить, на каких активных центрах происходит рекомбинация атомов азота и кислорода были проведены исследования рекомбинации атомов кислорода в смеси 10% O_2 + 90% He, атомов азота в смеси 20% N_2 + 80% He, а также совместной рекомбинации атомов азота и кислорода в смеси 10% O_2 + 20% N_2 + 70% He. Полученные данные представлены в виде таблицы.

Сумма вероятностей гетерогенной рекомбинации атомов азота и кислорода при отдельной

Суммы вероятностей гетерогенной рекомбинации атомов азота и кислорода при совместной и отдельной рекомбинации атомов

Отдельная рекомбинация		Совместная рекомбинация		Отношение сумм вероятностей рекомбинации	
T, K	$\gamma_{N_6} + \gamma_O, 10^{-4}$	T, K	$\gamma_{NC} + \gamma_{OC}, 10^{-4}$	T, K	$(\gamma_N + \gamma_O)/(\gamma_{NC} + \gamma_{OC})$
554	3.66	561	2.99	558	1.224
500	3.04	511	2.83	506	1.074
466	2.45	465	2.45	466	1
437	2.10	418	1.45	428	1.448
391	1.32	383	1.09	387	1.211
364	0.947	355	0.834	360	1.135
338	0.687	337	0.625	338	1.099
303	0.590	311	0.557	307	1.059

рекомбинации атомов (т.е. в двух экспериментах) в среднем только на 15% больше суммы вероятностей рекомбинации атомов азота и кислорода при их совместной рекомбинации на единой поверхности. Это свидетельствует о том, что практически все активные центры являются специализированными, т.е. на них происходит рекомбинация или атомов азота, или атомов кислорода. Атомы занимают “свои” активные центры независимо от наличия атомов другого типа. Доля универсальных активных центров, на которых происходит рекомбинация атомов и N и O, монотонно изменяется с температурой поверхности и составляет 0–45%.

Приведенные на рис. 3–7 и в таблице значения вероятностей рекомбинации согласуются с данными обзорной статьи [18] и работ [2–5, 19, 20], в которых использовались проточные реакторы и другие методики измерения концентрации атомов.

Рассмотрим данные по энергии активации рекомбинации по схеме Или–Ридила. Эффективная (усредненная по активным центрам) энергия активации E_a процесса рекомбинации атомов N и O при отдельной рекомбинации и давлениях 3–10 мбар равна соответственно 0.46 ± 0.02 и 0.49 ± 0.02 эВ. Понятно, что при совместном процессе рекомбинации E_a несколько увеличивается и составляет соответственно 0.56 ± 0.03 и 0.54 ± 0.03 эВ. Таким образом, $E_a = 0.44–0.59 \approx 0.5$ эВ. Энергия активации при рекомбинации по схеме Или–Ридила, по-видимому, связана со значительными затратами на десорбцию атома, адсорбированного на поверхности. Значения E_a , рассчитанные в работе [9], по методике Гиршфельдера [21], составляют $E_a = 0.055E_d = 0.14–0.2$ эВ [9], где E_d – энергия десорбции атомов на кварце, составляющая для кислорода от 2.59 эВ [10] до 3.51 эВ [11] и от 3.51 эВ [10] до 3.73 эВ [12] для азота.

В [20] при рекомбинации по схеме Ленгмюра–Хиншельвуда $E_a = 0.185$ эВ. Более высокие значе-

ния E_a в настоящей работе, по-видимому, связаны с очисткой поверхности кварца плавиковой кислотой, в результате чего остались активные центры с более высокими значениями энергии десорбции атомов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Полученные зависимости вероятностей гетерогенной рекомбинации γ атомов N и O от давления (0.01–10 мбар) и температуры (297–660 K) носят немонотонный характер. Изменения γ при увеличении температуры превышают изменения за счет увеличения давления.

2. Показано, что при давлениях 0.01–1 мбар и температурах поверхности 300–1000 K рекомбинация атомов N и O на кварце происходит преимущественно по механизму Ленгмюра–Хиншельвуда. При 3 мбар и выше и 300–1000 K рекомбинация атомов N и O на кварце следует механизму Или–Ридила.

3. Показано, что практически на всех активных центрах на кварце (в среднем на 85%) происходит рекомбинация атомов только N или только O. Можно ожидать, что это будет иметь место и для покрытий на основе кварца и материалов с защитной SiO₂-пленкой.

4. Получено, что энергия активации рекомбинации атомов азота и кислорода на кварце по схеме Или–Ридила составляет ~0.5 эВ.

5. Подтверждено наличие зависимости γ от состояния поверхности: наличия сорбированной воды, степени обезгаживания поверхности при нагреве, степени обработки (очистки) стенок реактора под воздействием высоких концентраций атомов до 10^{14} частиц/см³, ионов и излучения разряда. Комплексная очистка стенок реактора приводит к уменьшению определяемых значений γ атомов в 1.5–2 раза.

Работа выполнена по программе совместных фундаментальных исследований в области авиа-

сионно-космических технологий ФГУП «ЦАГИ» и институтов РАН при поддержке РФФИ (грант № 18-08-00020-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалев В.Л. Гетерогенные каталитические процессы в аэротермодинамике. М.: Физматлит, 2002. 224 с.
2. Александров Е.Н., Жестков Б.Е., Козлов С.Н. Одновременное определение вероятностей рекомбинации атомов азота и кислорода на кварце // ТВТ. 2014. Т. 52. № 1. С. 45.
3. Александров Е.Н., Егоров И.В., Жестков Б.Е., Козлов С.Н., Русаков С.В. О рекомбинации атомов азота и кислорода на теплозащитных материалах // Результаты фундаментальных исследований в прикладных задачах авиационного строения. М.: Наука, 2016. С. 150.
4. Холодкова Н.В., Холодков И.В., Бровикова И.Н. Влияние добавки аргона на диссоциацию молекул кислорода в тлеющем разряде постоянного тока // ТВТ. 2009. Т. 47. № 3. С. 473.
5. Холодков И.В., Холодкова Н.В., Смирнов С.А. Гетерогенная рекомбинация атомов кислорода на поверхности алюминиевой фольги в условиях низкотемпературной плазмы // ТВТ. 2016. Т. 54. № 5. С. 676.
6. Каблов Е.Н., Жестков Б.Е., Гращенков Д.В., Сорокин О.Ю., Лебедева Ю.Е., Ваганова М.Л. Исследование окислительной стойкости высокотемпературного покрытия на SiC-материале под воздействием высокоэнтальпийного потока // ТВТ. 2017. Т. 55. № 6. С. 704.
7. Колесников А.Ф., Гордеев А.Н., Васильевский С.А. Эффекты каталитической рекомбинации на поверхностях металлов и кварца для условий входа в атмосферу Марса // ТВТ. 2016. Т. 54. № 1. С. 32.
8. Козлов С.Н., Александров Е.Н., Жестков Б.Е., Кислюк М.У. Исследование рекомбинации атомов азота и кислорода на поверхности кварца методом резонансной флуоресцентной спектроскопии // Изв. АН СССР. Сер. химическая. 1987. № 11. С. 2449.
9. Kim Y.C., Boudart M. Recombination of O, N and H Atom on Silica: Kinetics and Mechanism // J. Langmuir. 1991. № 7. P. 2999.
10. Jumper E.J., Newman M., Seward W.A., Kitchen D.R. Recombination of Nitrogen on Silica-Based, Thermal – Protection-Tile-Like Surfaces // AIAA Paper 93-0477.
11. Jumper E.J., Seward W.A. Model for Oxygen Atom Recombination on Silicon-Dioxide Surfaces // J. Thermophys. Heat Transfer. 1991. V. 5. № 3. P. 284.
12. Nasuti F., Barbato M., Bruno C. Material-Dependent Catalytic Recombination Modeling for Hypersonic Flows // J. Thermophys. Heat Transfer. 1996. V. 10. № 1. P. 131.
13. Герасимова О.Е., Борисов С.Ф. Исследование рекомбинации атомов кислорода на поверхности диоксида кремния методом молекулярной динамики // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. www.chemphys.edu.ru/2006-11-20-001-pdf.
14. Александров Е.Н. Резонансная флуоресцентная спектроскопия разреженных пламен. Дис.... докт. хим. наук. М.: ИХФ АН СССР, 1986. 380 с.
15. Фюнфер Э., Нейерт Г. Счетчики излучений. Пер. с англ. М.: Гос. изд-во лит. в обл. атом. науки и техники, 1961. 400 с.
16. Samson J.A.R. Techniques of Vacuum Ultraviolet Spectroscopy. N.Y.—London: John Wiley & Sons, 1967. 343 p.
17. Жестков Б.Е., Грачев Н.Н. Измерение функции распределения по скоростям в высокотемпературном потоке времяпролетным методом в режиме счета отдельных частиц // ЖТФ. 1984. Т. 54. № 4. С. 716.
18. Холодкова Н.В., Холодков И.В. Гетерогенная рекомбинация атомов на поверхности твердых тел // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2014. Т. 57. Вып. 2. С. 3.
19. Бровикова И.Н., Галиаскаров Э.Г. Кинетические характеристики образования и гибели атомов азота в плазме // ТВТ. 2001. Т. 39. № 6. С. 873.
20. Бровикова И.Н. Кинетика образования и гибели атомов кислорода O(³P) в плазме воздуха // ТВТ. 2004. Т. 42. № 6. С. 869.
21. Гирифельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. Пер. с англ. Под ред. Ступоченко Е.В. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 929 с.