

УДК 537.924

**Анализ данных по сечениям возбуждения электронных состояний и ионизации атома водорода электронным ударом (обзор)***В. А. Шахатов, Ю. А. Лебедев*

*Представлен обзор сечений ионизации, возбуждения и девозбуждения атома водорода, полученных как в экспериментах, так и расчетным путем. Определен набор сечений, который требуется использовать при расчете функции распределения электронов по энергиям и определении уровневого коэффициента скоростей, необходимых при решении балансных уравнений для концентраций нейтральных и заряженных частиц в водородной плазме.*

PACS: 52.70.Kz; 52.25.Os; 52.55.Dy; 52.70.-m

*Ключевые слова:* атом водорода, сечение, ионизация, возбуждение, электронные состояния, плазма, база данных.

**Введение**

Плазмохимия водородной низкотемпературной плазмы (НТП) является динамично развивающимся научным направлением, обеспечивающим прогресс во многих областях науки и техники. Это и разработка газоразрядных источников интенсивных пучков отрицательных иона атомарного водорода  $H^-$  для обработки поверхности различных материалов или предварительного разогрева высокотемпературной плазмы в термоядерных реакторах, и использование газовых разрядов в водороде  $H_2$  с небольшими добавками углеводородов для осаждения углеродных (алмазоподобных и алмазных) пленок, и применение водородной НТП в сильноточных тиратронах и плазменной аэродинамике и др. [1—4]. Все сказанное обуславливает повышенный интерес к бесконтактной диагностике водородосодержащей НТП методами оптической актинометрии, лазерной, эмиссионной и абсорбционной спектроскопии [1—8].

Применение бесконтактных методов диагностики плазмы стимулирует развитие уровневого

полуэмпирических столкновительно-излучательных моделей (СИМ) водородной НТП для обработки и интерпретации результатов спектральных измерений [9—19]. Недосток существующих СИМ водородной плазмы состоит в том, что степень полноты кинетических схем (детализация по квантовым числам электронно-возбужденных состояний частиц, состав и количество столкновительно-излучающих процессов), используемых в этих моделях для исследований рождения и гибели возбужденных атомов и молекул водорода, недостаточна для интерпретации и обработки всей совокупности спектральных измерений.

Данная работа является продолжением работ [9—19], посвященных развитию уровневого полуэмпирической СИМ для интерпретации и обработки спектральных измерений водородной НТП. Расширенная детализация электронно-возбужденных состояний атома и молекулы водорода, учитываемых в уровневого полуэмпирической СИМ, приведена в [13, 19]. Здесь же выполнен численный анализ измеренных и рассчитанных сечений: неупругих столкновений молекулы водорода с электронами; упругих столкновений молекул и атомов водорода с электронами. На основе численного анализа сформирована база данных СИМ неупругих сечений молекулярно-электронных столкновений, а также упругих и транспортных сечений атомно-электронных и молекулярно-электронных столкновений. В [9—19] развита модель для описания кинетики столкновительно-излучательных процессов с участием молекул водорода в возбужденных синглетных состояниях, представляющих интерес для спектральной диагностики водородной НТП.

**Шахатов Вячеслав Анатольевич**, ведущий научный сотрудник.

**Лебедев Юрий Анатольевич**, заведующий лабораторией. Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН). Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., 29. Тел. 8 (495) 6475927 доб. 3-24. E-mail: shakhatov@ips.ac.ru

Статья поступила в редакцию 12 октября 2016 г.

© Шахатов В. А., Лебедев Ю. А., 2016

В настоящих исследованиях основное внимание уделяется следующим направлениям: развитию кинетической схемы процессов электрон-атомных столкновений, детализированной по полному орбитальному и угловому моменту электронов электронно-возбужденных состояний атома водорода, которые ответственны за формирование функций распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) и по энергетическим состояниям атомов водорода; созданию базы данных уровневых сечений, описывающих неупругие электрон-атомные столкновения и использующихся при решении кинетического уравнения для ФРЭЭ для расчета уровневых коэффициентов скоростей, необходимых при решении балансных уравнений для концентраций возбужденных частиц. Особое внимание уделяется излучающим электронно-возбужденным состояниям атома водорода, которые являются потенциально интересными для спектральной диагностики водородной НТП.

### Сечения возбуждения электронным ударом состояний атома водорода

Перечень столкновительных и излучательных процессов в атомарной низкотемпературной плазме приведен в [20—36]. Основные положения теории столкновений электронов с атомами изложены в [20—22, 28, 30, 37—44]. Экспериментальные и теоретические результаты определения сечений неупругих столкновений электронов с атомами водорода  $H$  приведены в [21, 23, 27, 32, 37, 40—146].

Экспериментально и теоретически изучено возбуждение электронным ударом состояний  $Y (= nl - {}^2L_J)$  из основного состояния  $1s - {}^2S_{1/2}$  атома водорода  $H$  с разрешением по главному квантовому числу  $n$  ( $=2, 3$ ) и полному орбитальному моменту электронов  $L$  ( $=0—2$ )

$$H(1s - {}^2S_{1/2}) + e \rightarrow H(Y) + e, \quad (1)$$

$$Y = 2s - {}^2S_{1/2}, 2p - {}^2P_J, 3s - {}^2S_{1/2}, \\ 3p - {}^2P_J, 3d - {}^2D_J,$$

и с разрешением по главному квантовому числу  $n \geq 2$

$$H(1s - {}^2S_{1/2}) + e \rightarrow H(n=2-6) + e. \quad (2)$$

Сечения неупругих столкновений, соответствующих переходам  $1s - {}^2S_{1/2} \rightarrow (n \leq 3)l - {}^2L_J$ , с детализацией по главному квантовому числу и

полному орбитальному моменту электронов, приведены: для метастабильного состояния  $2s - {}^2S_{1/2}$  атома водорода в [32, 40—42, 70—73, 75, 80, 81, 83, 85, 87, 89, 92—98, 100, 104, 114—128, 133—136, 142]; для излучающего состояния  $2p - {}^2P_J$  атома водорода в [21, 41—44, 70—73, 78, 80, 81, 83, 87—89, 91—100—104, 108, 113, 114, 141]; для излучающего состояния  $3s - {}^2S_{1/2}$  атома водорода в [32, 44, 70—77, 79—85, 97, 121, 140]; для излучающего состояния  $3p - {}^2P_J$  атома водорода в [32, 43, 44, 70—85, 140, 141]; для излучающего состояния  $3d - {}^2D_J$  атома водорода в [32, 43, 44, 70—75, 77, 80, 81, 83, 84, 85, 90, 121, 137].

Для переходов  $1s - {}^2S_{1/2} \rightarrow (n=2, 3, 4)$  значения рассчитанных и измеренных сечений без детализации по полному орбитальному моменту электронов приведены в следующих работах: для главного квантового числа  $n=2$  в [63, 86, 89, 90, 92, 99, 104—107, 109—112, 122, 123, 125, 129, 130—132]; для главного квантового числа  $n=3$  в [20, 32, 71, 86, 90, 104—106, 124, 125, 129, 139, 132]; для главного квантового числа  $n=4$  в [32, 124, 125].

Сечения, соответствующие переходам  $1s - {}^2S_{1/2} \rightarrow (n \geq 5)$ , без детализации по полному орбитальному моменту электронов, получены в результате расчетов в [32, 86].

В [125] и [124] приведены результаты измерений методом пересекающихся пучков полных сечений возбуждения электронно-возбужденных состояний атома водорода с главными квантовыми числами  $n=2$  и  $n=3, 4$  соответственно без разрешения по совокупности квантовых чисел полного орбитального момента  $L$  и углового момента  $J$  электронов.

Теоретические и экспериментальные значения сечений имеют заметный разброс. Работы [78, 80] являются одними из немногих, в которых затрагивается вопрос о формировании набора сечений возбуждения состояний  $H$  электронным ударом для практических расчетов при решении прикладных и фундаментальных задач. Рекомендованный в [80] для практических расчетов набор сечений определен для переходов  $1s - {}^2S_{1/2} \rightarrow (n \leq 3)l - {}^2L_J$  с использованием как измеренных, так и рассчитанных сечений.

В водородной НТП излучательные переходы, которые в совокупности формируют спектральный состав излучения плазмы (атомные линии серий

Лаймана, Бальмера и Пашена), из состояний с более высокими значениями главного квантового числа  $(n \leq 6)l - {}^2L_J$  [7, 13, 19]. Эти электронные состояния могут образоваться посредством различных механизмов физико-химических процессов, определение которых является важным, как для плазмохимии, так и для спектральной диагностики водородной НТП в ультрафиолетовом и видимом диапазоне длин волн.

В настоящей работе существенно расширена база данных неупругих сечений электрон — атомарных столкновений с соответствующим набором электронных состояний атома водорода по сравнению с данными, приведенными в [80, 78]. В отличие от других моделей водородной НТП, доступных в литературе и обсуждаемых в [9—19], в кинетическую схему уровневой полуэмпирической СИМ водородной НТП при решении кинетического уравнения для ФРЭЭ и балансных уравнений для концентраций атомов в возбужденных состояниях включены как прямые, так и обратные переходы  $1s - {}^2S_{1/2} \Leftrightarrow (n \leq 6)l - {}^2L_J$  [7, 13, 19]. Сечения неупругих атомно-электронных столкновений определяются на основе подхода, описанного в [13, 19]. Посредством созданных компьютерных кодов численно анализируются такие характеристики сечений, составивших базу данных СИМ [21, 23, 27, 32, 37, 40—146], как: порог возбуждения; максимальное значение сечения  $\sigma_{Y'' \rightarrow Y'}^{\max}$  ( $Y''$  — нижнее электронное состояние атома водорода, из которого происходит возбуждение верхнего электронного состояния  $Y'$  электронным ударом); энергия электрона  $\varepsilon^{\max}$ , при которой достигается данное максимальное значения сечения; зависимость от энергии электронов сечения  $\sigma_{Y'' \rightarrow Y'}^{eE,rel}(\varepsilon)$ , нормированного на данный максимум.

Основные моменты численного анализа и определения сечений неупругих атомно-электронных столкновений состоят в следующем.

I. Измеренные зависимости сечений от энергии электронов  $\sigma_{Y'' \rightarrow Y'}^{eE}(\varepsilon)$  нормируются на максимум сечения  $\sigma_{Y'' \rightarrow Y'}^{\max}$ .

II. Проводится анализ полученных данных с целью селекции сечений, для которых наблюдается наименьший разброс порогов возбуждения, величин  $\sigma_{Y'' \rightarrow Y'}^{\max}$  и зависимостей  $\sigma_{Y'' \rightarrow Y'}^{eE,rel}(\varepsilon)$ .

III. Для определения зависимости нормированного сечения  $\sigma_{Y'' \rightarrow Y'}^{eE,rel}(\varepsilon)$  от энергии электронов  $\varepsilon$  используются различные методы подгонки, из которых наиболее употребительный — подбор линейной комбинации заданных функций (кривых) методом наименьших квадратов для выбранных сечений.

IV. Значения сечений с разрешением по квантовым числам полного орбитального момента  $L$  и углового момента  $J$  электронов определяются с использованием выражений, приведенных в [37, 38, 43]. Вычисления сечений дезактивации возбужденных состояний атомов водорода электронным ударом определяются по известным сечениями возбуждения согласно принципу детального равновесия в предположении, что для исследуемого процесса возбуждения выполняется принцип микроскопической обратимости.

V. Абсолютные значения сечений возбуждения определяются средними значениями, для которых наблюдается наименьший разброс порогов,  $\sigma_{Y'' \rightarrow Y'}^{eE,rel}(\varepsilon)$  и  $\sigma_{Y'' \rightarrow Y'}^{\max}$ .

Следует отметить, что база данных определенных таким образом сечений не является окончательной. При решении прикладных и фундаментальных задач абсолютные значения и пороги возбуждения сечений тестируются из соображений наилучшего совпадения расчетных и измеренных параметров водородной НТП из базы экспериментальных данных СИМ по мере её пополнения.

Важная роль в исследованиях кинетики процессов рождения и гибели электронно-возбужденных состояний тяжелых частиц (атомов, молекул и их ионов) водородной НТП отводится атому водорода в метастабильном состоянии  $2s - {}^2S_{1/2}$ . Поэтому, применение подхода иллюстрируется численным анализом характеристик и определением сечения на примере перехода  $1s - {}^2S_J \rightarrow 2s - {}^2S_{1/2}$ .

Таблица 1

Результаты измерений и расчетов максимальных значений сечений возбуждения  $\sigma_{1s \rightarrow 2s}^{\max}$  состояния  $2s - ^2S_{1/2}$  атома водорода и энергии электронов  $\varepsilon^{\max}$ , при которой достигается максимальное значение сечения

$\sigma_{1s \rightarrow Y}^{\max}, 10^{-16}$ см <sup>2</sup>	$\varepsilon^{\max},$ эВ	Метод	Ссылка	$\sigma_{1s \rightarrow Y}^{\max},$ 10 <sup>-16</sup> см <sup>2</sup>	$\varepsilon^{\max},$ эВ	Метод	Ссылка
0,30	11,7	ПП	[142]	0,07	42,2	ПГ	[96]
0,1	12,6	ПП	[117] [118]	0,07	35,0	ПГ	[97]
0,1	11,7	ПП	[123]	0,22 1,4	13,6 13,6	Б1 БО	[127] [127]
0,15	11,6	ПП	[119]	0,05 0,12	54,5 30,6	Б1+П ИВ+П	[127] [127]
0,13	11,4		данная работа	0,32 0,09	13,6 19,6	СС ББ	[103] [103]
0,22	15,0	Б1	[142]	0,22	13,6	Б1	[103]
0,12	11,7	Б1+О					
0,06	13,6	СС	[116]	0,17 0,21	13,5 13,5	Б1 ИВ	[42] [42]
0,14	10,3	СС	[40]	0,18 0,25	13,5 13,5	СС БО	[42] [42]
0,07	37,8	ПГ	[40]	0,62	13,5		[42]
0,3	15,0	СС+О	[104]	0,03	13,5		[42]
0,2	15,3	Б1		1,7	13,5		[42]
0,2	16,7	Б1	[85]	0,17	11,2	ПФ	[80]
0,6	11,8	ИВ	[85]	0,16	12,3	ИФ	[80]
0,2	13,6	Б1+О	[87, 144]	0,16	13,6	ИВ+О	[134]
				0,45	13,5	СС	[136]
1,4	13,6	БО	[87, 144]	0,22	12,3	МР	[81]
0,39	13,6	БО+О					
0,3	13,0			0,14	14,7	ГР	[48]
0,15	12,2	СС	[70]				[49] [50]
0,12	14,3	СС	[89]	0,08	22,0	ПФ	[75]
0,16	12,3	СС	[72]	0,06	48,7	ПФ	[75]
0,1	15,6	ПФ	[73]	0,07	42,2	ПГ	[95]

Примечание. ПФ — полуэмпирическая формула, Б1 — приближение Борна первого порядка, Б1+О — приближение Борна первого порядка с учетом обменного взаимодействия, Б1+П — приближение Борна первого порядка с учетом поляризационного взаимодействия во третьем порядке, ББ — приближение Бете–Борна (Борна второго порядка), СС — метод сильной связи, ИВ — метод искаженной волны, ИВ+П — метод искаженной волны с учетом поляризационного взаимодействия во втором порядке; ПП — метод пересекающихся пучков, ПГ — приближение Глаубэра, БО+О — приближение Борна–Оппенгеймера с учетом эффекта электронного обмена, ИФ — метод интеграла Феймана, СС+О — метод сильной связи с учетом обменного взаимодействия, МР — метод Моррисона–Руджа, ГР — приближении Гризинского.

**Переход**  $1s - ^2S_J \rightarrow 2s - ^2S_{1/2}$ . В табл. 1 приведены результаты измерений и расчетов сечения, соответствующего переходу  $1s - ^2S_J \rightarrow 2s - ^2S_{1/2}$ : максимальные значения сечений  $\sigma_{1s \rightarrow 2s}^{\max}$ , энергии

электронов  $\varepsilon^{\max}$ , при которых достигаются эти значения, а также указаны экспериментальные и теоретические методы определения сечения.

Результаты измерений методом пересекающихся атомарного и электронного пучков полного

сечения возбуждения  $\sigma_{1s \rightarrow 2s}^{eE}(\varepsilon)$  метастабильного состояния  $2s - ^2S_{1/2}$  в диапазоне энергий электронов  $10,2 \leq \varepsilon \leq 1000$  эВ приведены в [117—120, 123, 133, 142].

В эксперименте [142] использовался поляризованный атомарный пучок. Это усовершенствование позволило исследовать обменное взаимодействие между атомным (связанным) электроном и налетающим электроном. Чтобы исследовать процесс возбуждения метастабильного состояния в широком диапазоне энергий электронов в [117] применялся модулированный атомарный пучок.

В [119, 120, 133] для создания электронного пучка использовалась электронная пушка высокого разрешения. Это позволило детально исследовать резонансную структуру сечения вблизи порога возбуждения 10,2 эВ состояния  $2s - ^2S_{1/2}$ .

В методе пересекающихся пучков непосредственно измерялись функции возбуждения [117—120, 123, 133, 142]. Для восстановления полного абсолютного значения сечения возбуждения  $\sigma_{1s \rightarrow 2s}^{eE}(\varepsilon)$  требуются нормировка этой функции. Абсолютные значения сечений в [118, 142] определены из нормировки экспериментальных данных на значение сечения, рассчитанного в приближении Борна первого порядка, в диапазоне значений энергий электронов от порога возбуждения до 30—40 эВ. Согласно [126] выполненная нормировка, является необоснованной.

Корректная процедура восстановления сечения выполнена в [117]. В [117, 123] абсолютные значения определены из соотношения значений сечений  $\sigma_{1s \rightarrow 2s}^{eE}(\varepsilon) / \sigma_{1s \rightarrow 2p}^{eE}(\varepsilon)$ , в котором абсолютное значение  $\sigma_{1s \rightarrow 2p}^{eE}(\varepsilon)$  также определялось, как и в [118, 142] из нормировки экспериментальных данных к значению сечения, рассчитанного в приближении Борна первого порядка, но в диапазоне более высоких значений энергий электронов  $\varepsilon = 250—700$  эВ.

Рассчитанное в [71] значение  $\sigma_{1s \rightarrow 2s}^{eE}(\varepsilon)$  методом сильной связи при  $\varepsilon = 10,8$  эВ использовалось для нормировки сечения, измеренного в [119]. Определенные таким образом средние максимальные значения сечений лежат в диапазоне  $\sigma_{1s \rightarrow 2s}^{\max} = (0,1—0,3) \times 10^{-16}$  см<sup>2</sup>. Погрешность определения  $\sigma_{1s \rightarrow 2s}^{\max}$  в экспериментах составляет 12—15 %.

Значение  $\sigma_{1s \rightarrow 2s}^{\max}$ , приведенное в [142] заметно выше, чем измеренные в [117—123]. Значения  $\sigma_{1s \rightarrow 2s}^{\max}$ , приведенные в [117, 118], согласуются в

пределах погрешности измерений. В то же время они также заметно меньше, чем значения  $\sigma_{1s \rightarrow 2s}^{\max}$ , приведенные в [119, 123]. Данные в [123] находятся в удовлетворительном согласии с измеренным в [119] значением  $\sigma_{1s \rightarrow 2s}^{\max}$ . Максимальные значения измеренных сечений лежат в диапазоне энергий электронов  $\varepsilon^{\max} = 11,7—12,6$  эВ (табл. 1).

Нормированные зависимости сечений  $\sigma_{1s \rightarrow 2s}^{eE,rel}(\varepsilon)$  от энергии электронов  $\varepsilon$  (функции возбуждения), измеренные в [117] и [118] удовлетворительно согласуются в диапазоне энергий электронов от порога возбуждения до 30 эВ. В диапазоне энергий электронов от порога возбуждения до  $\varepsilon^{\max}$  они быстро и монотонно возрастают, а при  $\varepsilon^{\max} \leq \varepsilon \leq 30$  эВ функции возбуждения  $\sigma_{1s \rightarrow 2s}^{eE,rel}(\varepsilon)$  резко уменьшаются с ростом энергии электронов. Причем они спадают намного быстрее, чем функции возбуждения  $\sigma_{1s \rightarrow 2s}^{eE,rel}(\varepsilon)$ , измеренные в [123, 142]. В диапазоне энергии электронов свыше 30 эВ поведение функций  $\sigma_{1s \rightarrow 2s}^{eE,rel}(\varepsilon)$  из [117] и [118] заметно различаются. В отличие от данных [117], которые представляют собой медленно уменьшающиеся  $\sigma_{1s \rightarrow 2s}^{eE,rel}(\varepsilon)$ , функция возбуждения, измеренная в [118], изменяется немонотонно. Данное расхождение, по видимому, объясняется тем, что в условиях эксперимента [118] присутствует каскадное заселение состояния  $2s - ^2S_{1/2}$  с высоколежащих возбужденных состояний атома водорода.

В [119, 120, 133] измеренная зависимость  $\sigma_{1s \rightarrow 2s}^{eE,rel}(\varepsilon)$  от  $\varepsilon$  в диапазоне энергий электронов от порога возбуждения до 12,3 эВ немонотонно изменяется, обладая рядом чередующихся резких максимумов и минимумов, обусловленных суперпозиции резонансов, образование которых подтверждается теоретическими исследованиями.

Определению дифференциального и полного сечений возбуждения  $\sigma_{1s \rightarrow 2s}^{eE}(\varepsilon)$  различными теоретическими методами посвящено большое количество работ [42, 70—73, 75, 80, 81, 83, 85, 87—90, 93—98, 103, 104, 109, 114, 116, 127—130, 132, 134, 136, 142, 144].

Значительная часть квантомеханических расчетов полных сечений для перехода  $1s - ^2S_J \rightarrow \rightarrow 2s - ^2S_{1/2}$  выполнена в различной модификации борновского приближения первого порядка или метода сильной связи. В [42, 85, 87, 104, 126—128, 134, 142, 144] расчет сечения проводился в приближении Борна первого порядка, как с учетом

обменного взаимодействия в первом порядке, так и без него, а также с учетом поляризованного взаимодействия в третьем порядке.

Метод сильной связи, как с учетом обменного взаимодействия, использовался при расчете сечения в [42, 70—73, 83, 89, 93, 94, 98, 104, 114, 116, 130, 136]. В [42, 85, 88, 127, 134, 135] полное сечение возбуждения получено методом искаженных волн. Отметим, что в [127] и [134] расчет сечения выполнен методом искаженных волн с учетом поляризованного взаимодействия во втором порядке и обменного взаимодействия, соответственно. Для расчета сечения возбуждения в [42, 87, 144] использовалось приближение Борна–Оппенгеймера, как с учетом обменного взаимодействия в первом порядке, так и без него. В [75, 80] определение сечений проводился с использованием полуэмпирических соотношений. Результаты расчетов полных сечений методом Глаубера и в классическом приближении приведены в [95—97] и [129], соответственно. В [90, 109, 132] и [80] расчеты сечения выполнены методами прицельного параметра и интеграла Феймана, соответственно. Методы Моррисона–Руджа и приближение Грининского использовались для расчета сечения в [81]. В [83] сечение рассчитывалось методом Бете–Борна.

В результате численного анализа результатов расчета сечений установлено, что расчетные значения  $\varepsilon^{\max}$  имеют заметный разброс в диапазоне от 10,3 до 54,5 эВ.

Значения  $\varepsilon^{\max}$ , полученные в [142], [85], [80], [81] и [73, 89] в приближении Борна первого порядка с учетом обменного взаимодействия, методами искаженных волн, интеграла Феймана, сильной связи и Моррисона–Руджа, соответственно, лежат в диапазоне экспериментальных значений  $\varepsilon^{\max} = 11,7 \div 12,6$  эВ.

Значения  $\varepsilon^{\max}$  полученные в [42, 85, 103, 104, 127, 142] в приближении Борна первого порядка, как с учетом обменного взаимодействия, так и без него, в [127] в приближении Борна первого порядка с учетом поляризованного взаимодействия, в [42] и [134] методом искаженной волны, как без учета, так и с учетом обменного взаимодействия, в [40, 42, 70, 72, 103, 104, 116, 136] методом сильной связи, в [32, 75, 80] с использованием полуэмпирических соотношений; в [87, 127, 144] в приближении Борна–Оппенгеймера, как с учетом обменного взаимодействия, так и без него, в [103] и [81] в приближениях Бете–Борна и Грининского находятся вне диапазона измеренных значений  $\varepsilon^{\max}$ . Заметное расхождение между расчетными и экспериментальными значениями  $\varepsilon^{\max}$  достигается при использовании приближения Глаубера [40, 95,

96, 97] и Борна первого порядка с учетом поляризованного взаимодействия [127].

Анализ расчетных значений  $\sigma_{1s \rightarrow 2s}^{\max}$  показывает, что они испытывают заметный разброс в диапазоне  $(0,03—1,7) \times 10^{-16}$  см<sup>2</sup>.

Величины  $\sigma_{1s \rightarrow 2s}^{\max}$ , рассчитанные в приближении Борна первого порядка, как с учетом обменного взаимодействия, так без него [42, 85, 87, 103, 104, 127, 142], в приближении Бете–Борна [103], методом сильной связи [40, 42, 70, 72, 73, 89, 103, 104], методом Моррисона–Руджа и в приближении Грининского [81], с использованием интеграла Феймана [80], а также с использованием полуэмпирических соотношений [32, 75, 80], методом искаженной волны, как без учета, так и с учетом обменного взаимодействия [42, 134] и с учетом поляризованного взаимодействия во втором порядке [127] попадают в диапазон измеренных значений  $\sigma_{1s \rightarrow 2s}^{\max} = (0,1—0,3) \times 10^{-16}$  см<sup>2</sup>.

Значения  $\sigma_{1s \rightarrow 2s}^{\max}$  полученные в [116] методом сильной связи, в приближении Глаубера [40] и Борна первого порядка с учетом поляризованного взаимодействия [127] меньше, чем измеренные величины.

Данные расчета  $\sigma_{1s \rightarrow 2s}^{\max}$  из [85] и [87, 127, 144], полученные методом искаженных волн и в приближении Борна–Оппенгеймера, как с учетом обменного взаимодействия, так и без него, соответственно, а также методом сильной связи с учетом вклада всех парциальных волн [136] заметно превышают измеренные значения  $\sigma_{1s \rightarrow 2s}^{\max}$ .

Результаты расчетов зависимости  $\sigma_{1s \rightarrow 2s}^{eE,rel}(\varepsilon)$  от энергии электронов  $\varepsilon$  с использованием полуэмпирического соотношения из [32], в приближении Борна первого порядка с учетом обменного взаимодействия [142] и методом искаженных волн [85] удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными [117—120] в диапазоне энергий  $\varepsilon \approx 10,2—17$  эВ. Однако свыше 17 эВ между расчетными и экспериментальными данными имеет место заметное расхождение.

Теоретические данные, полученные в приближении Борна первого порядка [42, 85, 87, 103, 104, 127, 142], методом сильной связи [42, 70, 72, 73, 89, 103, 104, 116, 136], методом искаженной волны, как без учета, так и с учетом обменного взаимодействия [42, 134], в приближении Бете–Борна [103], в приближении Глаубера [40] и Борна–Оппенгеймера, как с учетом обменного взаимодействия, так и без него [87, 127, 144], методом интеграла Феймана [80], Моррисона–Руджа и в

приближении Гризинского [81], а также на основе полуэмпирических соотношений [75, 80] заметно расходятся с экспериментальными результатами.

В данной работе нормированная зависимость  $\sigma_{1s \rightarrow 2s}^{eE,rel}(\varepsilon)$  от энергии электронов в диапазоне  $10,2 \leq \varepsilon \leq 30$  эВ определена с привлечением экспериментальных данных из [117—120]. В диапазоне свыше 30 эВ для восстановления  $\sigma_{1s \rightarrow 2s}^{eE,rel}(\varepsilon)$  использовались данные из [117]. Экспериментальные данные аппроксимировались методом кубических сплайнов. Зависимость  $\varepsilon_{1s \rightarrow 2s}^{eE}(\varepsilon)$  от  $\varepsilon$ , восстановленная в данной работе достигает максимального значения  $\sigma_{1s \rightarrow 2s}^{\max} = 0,13 \times 10^{-16} \text{ см}^2$  при  $\varepsilon^{\max} = 11,4$  эВ (табл. 1).

**Переходы**  $1s - ^2S_{1/2} \rightarrow (n = 3 - 6)l - ^2L_J$  и  $n''l'' - ^2L_{J''} \rightarrow n'l' - ^2L_{J'}$ . Для определения значений сечений, соответствующих переходам  $1s - ^2S_{1/2} \rightarrow 2p - ^2P_J$  и  $1s - ^2S_{1/2} \rightarrow 3s - ^2S_{1/2}$ ,  $1s - ^2S_{1/2} \rightarrow 3p - ^2P_J$ ,  $1s - ^2S_{1/2} \rightarrow 3d - ^2D_J$ , использовались экспериментальные данные из [100, 113, 131] и [74, 77, 84], соответственно. Значения сечений для переходов  $1s - ^2S_{1/2} \rightarrow (n = 4 - 6)p - ^2P_J$  определялись с использова-

нием выражений, приведенных в [22, 35, 37, 38, 43, 48—50, 85, 121, 145—146].

Нами также рассматриваются переходы  $n''l'' - ^2L_{J''} \rightarrow n'l' - ^2L_{J'}$ , соответствующие процессам ступенчатого возбуждения и девозбуждения электронных состояний атома водорода в столкновениях с электронами:

$$H(n''l'' - ^2L_{J''}) + e \Leftrightarrow H(n'l' - ^2L_{J'}) + e. \quad (3)$$

При решении кинетического уравнения для ФРЭЭ учитываются, как электрические дипольно-разрешенные переходы ( $\Delta L = \pm 1$ ,  $\Delta S = 0$ ,  $\Delta J = \pm 1$ ,  $\Delta J_z = 0, \pm 1$ ) [148], так и оптически-запрещенные переходы. Общее количество переходов между атомными электронными состояниями, учитываемых в СИМ, составляет 323. Значения сечений для данных переходов определялись с использованием данных, приведенных в [37, 38, 73, 85, 121].

В базу данных СИМ также включены сечения, рассчитанные с использованием аналитических выражений [20—22, 24, 26, 28, 35, 37, 38, 43, 48—50, 145—147]. Эти выражения позволяют оценить сечения  $\sigma_{X \rightarrow Y}^{eE}(\varepsilon)$  для переходов  $X \rightarrow Y$ , как между основным и электронно-возбужденным состоянием, так и между электронно-возбужденными состояниями атома водорода  $H$ :

$$\sigma_{X \rightarrow Y}^{eE}(\varepsilon) = 4\pi a_0^2 f_{X \rightarrow Y} \left( \frac{Ry}{\Delta\varepsilon_{X \rightarrow Y}} \right)^2 \left( \frac{\Delta\varepsilon_{X \rightarrow Y}}{\varepsilon} \right) \frac{\ln \left( 0,1 \frac{\varepsilon}{\Delta\varepsilon_{X \rightarrow Y}} + 0,9 \right)}{\frac{\varepsilon}{\Delta\varepsilon_{X \rightarrow Y}} - 0,7}, \quad \varepsilon > \Delta\varepsilon_{X \rightarrow Y}, \quad (4)$$

$$\sigma_{X \rightarrow Y}^{eE}(\varepsilon) = 4\pi a_0^2 f_{X \rightarrow Y} \left( \frac{Ry}{\Delta\varepsilon_{X \rightarrow Y}} \right)^2 \left\{ \frac{\left( \frac{\varepsilon}{\Delta\varepsilon_{X \rightarrow Y}} \right) - 1}{\left( \frac{\varepsilon}{\Delta\varepsilon_{X \rightarrow Y}} \right)^2} \ln \left( 0,1 \frac{\varepsilon}{\Delta\varepsilon_{X \rightarrow Y}} + 0,9 \right) + \frac{Y_{col}}{\left( \frac{\varepsilon}{\Delta\varepsilon_{X \rightarrow Y}} \right)} \right\}, \quad \varepsilon > \Delta\varepsilon_{X \rightarrow Y}, \quad (5)$$

$$\sigma_{X \rightarrow Y}^{eE}(\varepsilon) = 0, \quad \varepsilon < \Delta\varepsilon_{X \rightarrow Y},$$

$$\sigma_{X \rightarrow Y}^{eE}(\varepsilon) = 4\pi a_0^2 f_{X \rightarrow Y} \left( \frac{Ry}{\Delta\varepsilon_{X \rightarrow Y}} \right)^2 \left\{ \frac{u}{(u+1)^2} \ln(1,25(u+1)) + \frac{Y_{ol}}{u+1} \right\}, \quad \varepsilon > \Delta\varepsilon_{X \rightarrow Y}, \quad (6)$$

$$u = (\varepsilon - \Delta\varepsilon_{X \rightarrow Y}) / \Delta\varepsilon_{X \rightarrow Y},$$

$$\sigma_{X \rightarrow Y}^{eE}(\varepsilon) = \frac{8\pi f_{X \rightarrow Y}}{\sqrt{3}} \pi a_0^2 \sqrt{\left(\frac{Ry}{\Delta\varepsilon_{X \rightarrow Y}}\right) \frac{\gamma_R(u)}{u+1}}, \quad \varepsilon > \Delta\varepsilon_{X \rightarrow Y},$$

$$\gamma_R(u) = \sum_{i=0}^{i=4} a_i u^i,$$

$$a_0 = 0,01826, a_1 = 0,09385, a_2 = -0,00461, a_3 = 1,25646 \cdot 10^{-4}, a_4 = -1,33699 \cdot 10^{-6},$$

$$u = (\varepsilon - \Delta\varepsilon_{X \rightarrow Y}) / \Delta\varepsilon_{X \rightarrow Y}, \quad (7)$$

$$\sigma_{X \rightarrow Y}^{eE}(\varepsilon) = 0, \quad \varepsilon < \Delta\varepsilon_{X \rightarrow Y};$$

$$\sigma_{X \rightarrow Y}(\varepsilon) = 4\pi a_0^2 \xi_X \left\{ \left(\frac{I_H}{\Delta\varepsilon_{X \rightarrow Y}}\right)^2 g(u_Y, v_Y) - \left(\frac{I_H}{\Delta\varepsilon_{X \rightarrow Y+1}}\right)^2 g(u_{Y+1}, v_{Y+1}) \right\},$$

$$g(u, v) = \frac{u-1}{u^2} \left(\frac{u}{u+v}\right)^{3/2} \left(1 - \frac{1}{u}\right)^{v/(v+1)} \left\{ 1 + \frac{2v}{3} \left(1 - \frac{1}{2u}\right) \ln \left[ e + \sqrt{\frac{u-1}{v}} \right] \right\},$$

$$u_p = \varepsilon / \Delta\varepsilon_{X \rightarrow p}, \quad v_p = \varepsilon_{iX} / \Delta\varepsilon_{X \rightarrow p}. \quad (8)$$

Здесь  $Ry$  и  $a_0$  — постоянные Ридберга и радиуса Бора, которые равны  $2,1799 \cdot 10^{11}$  эрг и  $0,5292 \cdot 10^{-8}$  см, соответственно, [149, 150, 151, 152, 35].  $Y_{col}$  — параметр, определяемый следующим образом:  $Y_{col} = 0,3$  — для переходов из основного состояния в первое возбужденное;  $Y_{col} = 0,2$  — для переходов из основного состояния в более высокие;  $Y_{col} = 0,1$  — для всех остальных переходов.

Использование формул (4—7) требует знание сил осцилляторов  $f_{X \rightarrow Y}$  в поглощении для электрических дипольно-разрешенных переходов  $Y \rightarrow X$ . Соотношения для определения и табличные данные значений сил осцилляторов в поглощении, соответствующих различным переходам  $H$ , приведены в [32, 38, 37, 43, 148, 153—158].

Формула (8) описывает возбуждение атома водорода для перехода  $X \rightarrow Y$ , в котором величины  $\Delta\varepsilon_{X \rightarrow Y}$  и  $\Delta\varepsilon_{X \rightarrow Y+1}$  являются значениями порогов энергий возбуждения состояний  $Y$  и  $Y+1$ . Причем  $Y+1$  является следующим за  $Y$  ближайшим возбужденным состоянием  $H$ , с которого возможен

электрический дипольно-разрешенный переход. Величина  $\xi_X$  является числом эквивалентных электронов для  $H$  в нижнем состоянии  $X$ . В случае  $H$  она равна единице. Величина  $I_H$  определяет потенциал ионизации  $H$  из основного электронного состояния и она равна  $109678,76 \text{ см}^{-1}$  [35, 149—152].  $\varepsilon_{iX}$  является энергией ионизации  $H$  из состояния  $X$ , а индекс  $p$  принимает значения  $Y$  и  $Y+1$ .

База данных СИМ также включает сечения возбуждения  $\sigma_{X \rightarrow Y}^{eE}(\varepsilon)$  атома водорода электронным ударом, рассчитанные с использованием полуэмпирических выражений [27, 32, 80]. Для электрических дипольно-разрешенных и запрещенных (вследствие нарушения правила отбора по квантовому числу момента количества движения электрона  $\Delta L \neq 0$ ) переходов  $1s - {}^2S_{1/2} \rightarrow 2l - {}^2L_J$ , ( $l = s, p; L = S, P$ ) выражения для полных сечений (без разрешения по квантовому числу  $J$ ) имеют вид [27, 32, 80]:

$$\sigma_{1s \rightarrow 2l}^{eE}(\varepsilon) = 10^{-16} [a + b(\varepsilon - \Delta\varepsilon_{s \rightarrow 2l})], \quad 10,2 \text{ эВ} < \varepsilon \leq 11,56 \text{ эВ},$$

$$\sigma_{1s \rightarrow 2l}^{eE}(\varepsilon) = c, \quad 11,56 \text{ эВ} < \varepsilon \leq 12,23 \text{ эВ}, \quad (9)$$

$$\sigma_{1s \rightarrow 2l}^{eE}(\varepsilon) = \frac{\sigma_0}{\Delta\varepsilon_{1s \rightarrow 2l} u} \left[ A_0 \ln u + \sum_{j=1}^5 \frac{A_j}{x^{j-1}} \right], \quad \varepsilon \geq 12,23 \text{ эВ},$$

$$\sigma_0 = 5,984, \quad u = \varepsilon / \Delta\varepsilon_{1s \rightarrow 2l}, \quad (10)$$

$$\sigma_{1s \rightarrow 2l}^{eE}(\varepsilon) = a_0^2 \frac{p_1}{(u + p_2)^{p_3}} \left[ \frac{u}{u+1} \right]^{p_1},$$

$$u = (\varepsilon - \Delta\varepsilon_{1s \rightarrow 2l}) / \Delta\varepsilon_{1s \rightarrow 2l}, \quad (11)$$

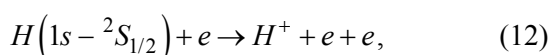


$$p_0 = 0,572, p_1 = 0,103, p_2 = 0,554, p_3 = 0,670, \text{ для перехода } 1s \rightarrow 2s, \\ p_0 = 982,0, p_1 = 0,448, p_2 = 35,4, p_3 = 1,610, \text{ для перехода } 1s \rightarrow 2p.$$

Здесь  $\Delta\varepsilon_{1s \rightarrow 2l}$  — пороговое значение энергии, которое независимо от значений квантовых чисел  $l = s, p$  ( $L = S, P$ ) равно 10,2 эВ, а  $\varepsilon$  — энергия столкновения  $H$  с электроном, которая выражена в эВ.

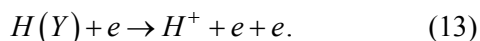
### Ионизация атомарного водорода в столкновениях с электронами

Определению сечения ионизации атомарного водорода в основном состоянии  $1s \rightarrow 2S_{1/2}$  электронным ударом



посвящены экспериментальные [27, 45, 46, 52, 58, 62, 64—66, 159] и теоретические [23, 37, 47, 48—50, 51, 53—57, 59—61, 63, 67—69, 160, 161] работы. Эти данные составили базу данных СИМ. Сечение ионизации  $H(1s - 2S_{1/2})$  электронным ударом, используемое в СИМ при решении уравнения для ФРЭЭ и определения коэффициента скорости ионизации определялось, с привлечением экспериментальных данных [46, 58, 64, 65, 159].

Кроме процесса (12), при решении кинетического уравнения для электронов в учитываются процессы ступенчатой ионизации:



Здесь  $Y$  являются электронно-возбужденными состояниями ( $Y = 2s - 2S_{1/2}, 2p - 2P_J, 3s - 2S_{1/2}, 3p - 2P_J, 3d - 2D_J$ ) атома водорода. Значения сечений данных процессов определялись на основе соотношений, приведенных в [37, 38, 43].

### Заключение

В представленном обзоре проведен анализ большого количества экспериментальных и расчетных данных сечений ионизации, возбуждения и девозбуждения электронных состояний атомарного водорода в столкновениях с электронами. Рассмотрены процессы ионизации и возбуждения как из основного состояния атома водорода, так ступенчатые соответствующие процессы. Определен набор сечений, который целесообразно использовать при расчете ФРЭЭ и определении уровней коэффициентов скоростей процессов ионизации, возбуждения и девозбуждения электронных состояний атома водорода в столкновениях с электронами, необходимых при решении балансных

уравнений для концентрации нейтральных и заряженных частиц водородной НТП. Сечения определены с детализацией по главному квантовому числу, полному орбитальному и угловому моменту электронов связанных состояний атома водорода.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№ 15-08-00070).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Шахатов В. А., Лебедев Ю. А., Lacoste A., Bechu S. // ТВТ. 2016. Т. 54. № 4. С. 491.
2. Lacoste A., Bechu S., Лебедев Ю. А., Шахатов В. А. / XLIII Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС (г. Звенигород, Россия, 8–12 февраля, 2016). — М.: ООО "Издательство МБА", 2016. С. 207.
3. Bechu S., Lacoste A., Lebedev Yu. A., Shakhmatov V. A. / IX International Workshop on Microwave Discharges: Fundamentals and Applications (Cordoba, Spain, September 7-11, 2015) Cordoba: Cordoba University, 2015. P.32.
4. Béchu S., Aleiferis S., Svarnas P., Shakhmatov V. A., Lebedev Yu. A., et al. / 22nd International Symposium on Plasma Chemistry (ISPC 22, Belgium, Antwerp, July 5–10 2015) Antwerp: Antwerp university, 2015. P. 78.
5. Bechu S., Lacoste A., Лебедев Ю. А., Шахатов В. А. // Прикладная физика. 2015. № 2. С. 45.
6. Шахатов В. А., Лебедев Ю. А. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 1. С. 21.
7. Шахатов В. А., Лебедев Ю. А. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 6. С. 571.
8. Верещагин К. А., Гордеев О. А., Смирнов В. В., Шахатов В. А. В кн. Комбинационное рассеяние — 80 лет исследований. — М.: ФИАН, 2009.
9. Шахатов В. А., Лебедев Ю. А., Lacoste A., Bechu S. // ТВТ. 2016. Т. 54. № 1. С. 123.
10. Шахатов В. А., Лебедев Ю. А., Lacoste A., Bechu S. // ТВТ. 2015. Т. 53. № 4. С. 601.
11. Lebedev Yu. A., Shakhmatov V. A., Lacoste A., Bechu S. / VII Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии (ISTARPC-2014, Россия, г. Плѣс, Ивановская область, 3–7 сентября 2014). — Иваново: Иван. гос. хим.-технолог. ун-т., 2014. С. 46.
12. Лебедев Ю. А., Шахатов В. А., Лакосте А., Бешу С. / Десятая Международная конференция Сеточные методы для краевых задач и приложения (Россия, Казань, 2014). — Казань: Казанский университет, 2014. С. 703.
13. Шахатов В. А., Лебедев Ю. А. // ТВТ. 2011. Т. 49. № 2. С. 265.
14. Шахатов В. А., Лебедев Ю. А. / VI Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии (ISTARPC-2011, Россия, г. Иваново, 3–9 сентября 2011). — Иваново: Иван. гос. хим.-технолог. ун-т., 2011. С. 157.
15. Шахатов В. А., Лебедев Ю. А. / VI Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии (ISTARPC-2011, Россия, г. Иваново, 3–9 сентября 2011). — Иваново: Иван. гос. хим.-технолог. ун-т., 2011. С. 154.

16. Шахатов В. А., Лебедев Ю. А. / VI Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазموхимии (ISTAPC-2011, Россия, г. Иваново, 3–9 сентября 2011). — Иваново: Иван. гос. хим.-технолог. ун-т., 2011. С. 150.
17. Лебедев Ю. А., Шахатов В. А. В кн. «Энциклопедии низкотемпературной плазмы», Т. IX-3, Оптика низкотемпературной плазмы, Под ред. В. Н. Очкина. — М.: Янус-К, 2009. С. 73.
18. Лебедев Ю. А., Шахатов В. А. / VI Российский семинар. Современные средства диагностики плазмы и их применения для контроля веществ и окружающей среды (Россия, Москва, МИФИ, 22–24 октября 2008). — М.: МИФИ, 2008. С. 51.
19. Шахатов В. А. Дис...докт. физ.-мат. наук. — М.: ИХХС РАН, 2016.
20. Атомные и молекулярные процессы. Под ред. Д. Бейтса. — М.: Мир, 1964.
21. Хастед Д. Физика атомных столкновений. — М.: Мир, 1965.
22. Смирнов Б. М. Атомные столкновения и элементарные процессы в плазме. — М.: Атомиздат, 1968.
23. Смирнов Б. М. Ионы и возбужденные атомы в плазме. — М., Атомиздат, 1974.
24. Митчнер М., Кругер Ч. Частично ионизованные газы. — М.: Мир, 1976.
25. Словецкий Д. И. Механизмы химических реакций в неравновесной плазме. — М.: Наука, 1980.
26. Биберман Л. М., Воробьев В. С., Якубов И. Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. — М.: Наука, 1982.
27. Janev R. K., Langer W. D., Evans K., Post D. E. Elementary Processes in Hydrogen – Helium Plasmas. Volume 4. Cross Sections and Reaction Rate Coefficients. — Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo: Springer-Verlag, 1987.
28. Семиохин И. А. Элементарные процессы в низкотемпературной плазме. Учеб. Пособие. — М.: Изд-во Моск. Унта, 1988.
29. Протасов Ю. С., Чувашев С. Н. В кн. «Энциклопедия низкотемпературной плазмы», Вводный Том I, Под ред. акад. В. Е. Фортова. — М.: Наука/Интерпериодика, 2000.
30. Елецкий А. В., Смирнов Б. М. В кн. «Энциклопедия низкотемпературной плазмы», Вводный Том I, Под ред. акад. В. Е. Фортова. — М.: Наука/Интерпериодика, 2000.
31. Справочник констант элементарных процессов с участием атомов, ионов, электронов, фотонов. Под ред. А. Г. Жиглинского. — С.-Пб.: Изд. СПбУ. 1994.
32. Janev R. K., Reiter D., Samm U. В кн. «Энциклопедия низкотемпературной плазмы», Серия Б, Справочные приложения, Базы и Банки Данных, Т. V-1, Диагностика низкотемпературной плазмы, Часть II, Под ред. В. Н. Колесникова. — М.: Янус-К 2007.
33. Janev R. K. // Atomic and Plasma-Material Interaction Data for Fusion. 2001. Vol. 9. P. 1.
34. Лебедев В. С. В кн. «Энциклопедия низкотемпературной плазмы», Серия Б, Справочные приложения, Базы и Банки Данных, Т. V-1, Диагностика низкотемпературной плазмы, Часть II, Под ред. В. Н. Колесникова. — М.: Янус-К 2007.
35. Физико-химические процессы в газовой динамике. Справочник. Т.1: Динамика физико-химических процессов в газе и плазме. Второе издание. Под ред. Г. Г. Черного, С. А. Лосева. — М.: Наука, 2007.
36. Marques L., Jolly J., Alves L. L. // J. Appl. Phys. 2007. Vol. 102. P. 063305.
37. Вайнштейн Л. А., Собельман И. И., Юков Е. А. Возбуждение атомов и уширение спектральных линий. — М.: Наука, 1979.
38. Вайнштейн Л. А., Шевелько В. П. Структура и характеристики ионов в горячей плазме. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986.
39. Никитин Е. Е., Смирнов Б. М. Атомно-молекулярные процессы: В задачах с решениями. — М.: Наука Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.
40. Друкарев Г. Ф. Столкновения электронов с атомами и молекулами. — М.: Наука, 1978.
41. Гайлунтус М. К. Метод сильной связи в теории электрон-атомных столкновений // УФН. 1975. Т. 116. Вып. 4. С. 665.
42. Massey H. S. W. Theory of the Scattering of Slow Electrons // Reviews of Modern Phys. 1956. Vol. 28. P. 199.
43. Собельман И. И. Введение в теорию атомных спектров. — М.: Физматлит., 1963.
44. Moisewitsch B. I., Smith S. J. // Reviews of Modern Physics. 1968. Vol. 40. No. 2. P. 238.
45. Veldre V., Vinkaln I. In book «Atomic Collisions». — Riga: Izd-vo Akad. Nauk. Latv. S.S.R., 1965.
46. Shah M. B., Elliott D. S., Gilbody H. B. // J. Phys. 1987. B Vol. 20. P. 3501.
47. Kim Y.-K., Rudd M. E. // Phys. Rev. 1994 A. Vol. 50. P. 3954.
48. Gryzinski M. // Phys. Rev. A 1965. Vol. 138. P. 305.
49. Gryzinski M. // Phys. Rev. A 1965. Vol. 138. P. 322.
50. Gryzinski M. // Phys. Rev. A 1965. Vol. 138. P. 336.
51. Younger S. M. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 1981. Vol. 26. P. 329.
52. Fite W. L., Brackmann R. T. // Phys. Rev. 1958. Vol. 112. P. 1141.
53. Thomson J. J. // Phil. Mag. 1912. Vol. 23. P. 449.
54. Drawin H. W. // Z. Physik. 1961. Vol. 164. P. 513.
55. Lotz W. // Zs. Physik. 1968. B. 216. S. 241.
56. Rudge M. R. H. // Rev. Mod. Phys. 1968. Vol. 40. No 1. P. 564.
57. Burke P. G., Taylor A. J. // Proc. Roy. Soc. (London). 1965. A Vol. 273. P. 372.
58. Rothe E. W., Marino L. L., Neynaber R. H., Trujillo S. M. // Phys. Rev. 1962. Vol. 125. P. 582.
59. Geltman S., Rudge M. R. H., Seaton M. J. // Proc. Phys. Soc. (London). 1963. Vol. 81. P. 375.
60. Rudge M. R. H., Schwartz S. B. // Proc. Phys. Soc. (London). 1966. Vol. 88. P. 563.
61. Ochkur V. I. // Sov. Phys. JETP. 1965. Vol. 20. P. 1175.
62. Michael J. A. PhD. Thesis. Ohio: Case Institute of Technology, 1963.
63. Satbler R. C. // Phys. Rev. 1964. A Vol. 133. P. 1268.
64. Shyn T. W. // Phys. Rev. 1992. A Vol. 47. P. 2951.
65. McGowan J. W., Clarke E. M. // Phys. Rev. 1968. Vol. 167. P. 43.
66. Boksenburg A. PhD. Thesis. London: University College, 1960.
67. Percival I. C., Valentine N. A. // Proc. Phys. Soc. (London). 1966. Vol. 88. P. 885.
68. Abrines R., Percival I. C. // Proc. Phys. Soc. (London). 1966. Vol. 88. P. 861.
69. Burgess A. Research Report A.E.R.E. R 4818 (Proceedings of the Culham Symposium). 1964.
70. Burke P. G., Schey H. M., Smith K. // Phys. Rev. 1963. Vol. 129. P. 446.
71. Burke P. G., Ormonde S., Whitaker W. // Proc. Phys. Soc. (London). 1967. Vol. 92. P. 319.
72. Callaway J., Unnikrishnan K. // Phys. Rev. A 1993. Vol. 48. P. 4292.
73. Callaway J., Unnikrishnan K., Oza D. H. // Phys. Rev. 1987. A Vol. 36. P. 2576.
74. De Heer F. J., McDowell M. R. C., Wagenaar R. W. // J. Phys. 1977. B Vol. 10. P. 1945.
75. Felden M. M., Felden M. A. // Astrophys. J. 1972. Vol. 174. P. 219.
76. Flannery M. R., McCam K. J. // J. Phys. B. 1974. Vol. 7. P. L522.

77. Mahan A. H., Gallagher A., Smith S. J. // Phys. Rev. 1976. Vol. 13. P. 156.
78. McCoyd G. C., Milford S. N., Wahl J. J. // Phys. Rev. 1960. Vol. 119. P. 149.
79. McDowell M., Syms R., Morgan L., Myerscough V. / Tenth International Conference on the Physics of Electronic and Atomic Collisions: Invited Papers and Progress Reports. — Amsterdam: North-Holland Company, 1975. P. 185.
80. Mityureva A. A., Smirnov V. V. // Optics and Spectroscopy. 2006. Vol. 101. P. 338.
81. Morrison D. J. T., Rudge M. R. H. // Proc. Phys. Soc. (London). 1966. Vol. 89. P. 45.
82. Somerville W. B. // Proc. Phys. Soc. (London). 1963. Vol. 82. P. 446.
83. Whelan C. T., McDowell M. R. C., Edmunds P. W. // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 1987. Vol. 20. P. 1587.
84. Williams J. F., Barlett P. I., Bray I., Stelbovics A. T., Mikosza A. G. // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2006. Vol. 39. P. 719.
85. Vainstein L. A. // Opt. Spectrosk. 1961. Vol. 11. P. 301.
86. Johnson L. C. // Astrophys. J. 1972. Vol. 174. P. 227.
87. Bell K. L., Moiseiwitsch B. L. // Proc. R. Soc. (London). 1963. Vol. 276. P. 346.
88. Calhoun R. V., Madison D. H., Shelton W. N. // Phys. Rev. 1976. A Vol. 14. P. 1380.
89. Callaway J. // Phys. Rev. 1985. A Vol. 32. P. 775.
90. Sampson D. H., Golden L. B. // Ap. J. 1970. Vol. 161. P. 321.
91. Fite W. L., Brackmann R. T. // Phys. Rev. 1958. Vol. 112. P. 1151.
92. Fon W. C., Aggarwal K. M., Ratnavelu K. // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 1992. Vol. 25. P. 2625.
93. Galitis M., Damburg R. // Proc. Phys. Soc. 1963. Vol. 82. P. 192.
94. Galitis M., Damburg R. // Proc. Phys. Soc. Lett. To Editors. 1963. Vol. 82. P. 1068.
95. Gau J. N., Macek J. // Phys. Rev. 1975 A Vol. 12. P. 1760.
96. Byron F. W. // Phys. Rev. 1971. A Vol. 4. P. 1907.
97. Tai H., Bassel R. H., Gerjuoy E., Franco V. // Phys. Rev. 1970 A. Vol. 1. P. 1819.
98. Geltman S., Burke P. G. // J. Phys. B: Atom. Molec. Phys. 1970. Vol. 3. P. 1062.
99. McGowan J. W., Williams J. F., Curley E. K. // Phys. Rev. 1969. A Vol. 180. P. 132.
100. Fite W. L., Stebbings R. F., Brackmann R. T. // Phys. Rev. 1959. Vol. 116. P. 356.
101. Burke V. M., Seaton M. J. // Proc. Phys. Soc. 1961. Vol. 77. P. 199.
102. Khashaba S., Massey H. S. W. // Proc. Phys. Soc. 1958. Vol. 71. P. 574.
103. Kingston A. E., Fon W. C., Burke P. G. // J. Phys. B: Atom. Molec. Phys. 1976. Vol. 9. P. 605.
104. Omidvar K. // Phys. Rev. 1964. A Vol. 133. P. 970.
105. Kingston A. E., Lauer J. E. // Proc. Phys. Soc. (London). 1966. Vol. 87. P. 399.
106. Kingston A. E., Lauer J. E. // Proc. Phys. Soc. (London). 1966. Vol. 88. P. 597.
107. McCarroll R. // Proc. Phys. Soc. (London). 1957. A Vol. 70. P. 460.
108. Seaton M. J. // Proc. Phys. Soc. (London). 1964. Vol. 79. P. 1105.
109. Sarah H. E. // Proc. Phys. Soc. 1964 Vol. 83. P. 763.
110. Burgess A. In Book «Atomic Collision Processes» Ed. by McDowell M.R.C. — Amsterdam: North-Holland Publ. Co., 1964. P. 237.
111. Burgess A. / Third International Conference on Physics of Electronic and Atomic Collisions (England, London, 22–26 July, 1963). — Amsterdam: North-Holland Publ. Co., 1963. P. 238.
112. Omidvar K. // Phys. Rev. 1965. A Vol. 140. P. 38.
113. Van Wyngaarden W. L., Walters H. R. J. // J. Phys. B: At. Mol. Phys. 1986. Vol. 19. P. L53.
114. Taylor A. J., Burke P. G. // Proc. Phys. Soc. 1967. Vol. 92. P. 336.
115. Marriot R. // Proc. Phys. Soc. 1958. Vol. 72. P. 121.
116. Lichten W. // Phys. Rev. Lett. 1961. Vol. 6. P. 12.
117. Stebbings R. F., Fite W. L., Hummer D. G., Brackmann R. T. // Phys. Rev. 1960. Vol. 119. P. 1939.
118. Hils D., Kleinpoppen H., Koschmieder H. // Proc. Phys. Soc. 1966. Vol. 89. P. 35.
119. Koschmieder H., Raible V., Kleinpoppen H. // Phys. Rev. 1973. A Vol. 8. P. 1365.
120. Elston S. B., Lawton S. A., Pichanick F. M. T. Electronic and Atomic Collisions IX ICPEAC, Abstracts of Papers, 1975, Seattle.
121. Байнштейн Л. А. // Оптика и спектроскопия. 1965. Т. 18. С. 538.
122. Calhoun R. V., Madison D. H., Shelton W. N. // Phys. Rev. 1976. A Vol. 14. P. 1380.
123. Kauppila W., Ott W. R., Fite W. L. // Phys. Rev. 1970. A Vol. 1. P. 1099.
124. Grafe A., Sweeney C. J., Shyn T. W. // Phys. Rev. 2001. A Vol. 64. P. 032704-1.
125. Grafe A., Sweeney C. J., Shyn T. W. // Phys. Rev. 2001. A Vol. 63. P. 052715-1.
126. Hummer D. G., Seaton M. J. // Phys. Rev. Lett. 1961. Vol. 6. P. 471.
127. Kingston A. E., Moiseiwitsch B. L., Skinner B. G. // Proc. R. Soc. (London). 1960. Vol. 258. P. 245.
128. Smith K. // Phys. Rev. 1960. Vol. 120. P. 845.
129. Bates D. R., Kingston A. E., McWhirter R. W. // Proc. Roy. Soc. (London). 1962. A Vol. 267. P. 297.
130. Burke P. G., Webb T. G. // J. Phys. B: Atom. Mol. Phys. 1970. Vol. 3. P. L131.
131. Long R. L., Cox D. M., Smith S. J. // J. Res. N.B.S. 1968. A Vol. 72. P. 521.
132. Johnson L. C., Hinnov E. // Phys. Rev. 1969. Vol. 187. P. 143.
133. Oed A. // Phys. Lett. 1971. A Vol. 134. P. 435.
134. Erskine G. A., Massey H. S. W. // Proc. Roy. Soc. (London). 1952. A Vol. 212. P. 521.
135. Oshkur V. I. // Vest. Leningr. Univ. Ser. Fiz. i. Khim. 1958. Vol. 4. P. 53.
136. Smith K., Miller W. F., Mumford A. J. P. // Proc. Phys. Soc. (London). 1960. Vol. 76. P. 559.
137. Bhadra K., Ghosh A. S. // Phys. Rev. Lett. 1971. Vol. 26. P. 737.
138. Bates D. R. // Proc. Roy. Soc. (London). 1962. A Vol. 270. P. 155.
139. Kleinpoppen H., Kraiss E. // Phys. Rev. 1967. Vol. 20. P. 361.
140. McDowell M., Myerscough V., Narian U. // J. Phys. 1974. B Vol. 7. P. L195.
141. McCoyd G. C., Milford S. N. // Phys. Rev. 1963. Vol. 130. P. 206.
142. Lichten W., Schulz S. // Phys. Rev. 1959. Vol. 116. P. 1132.
143. Stabler R. C. // Phys. Rev. 1964. A Vol. 133. P. 1268.
144. Bell K. L. // Proc. Phys. Soc. (London). 1965. Vol. 86. P. 246.
145. Лелевкин В. М., Оторбаев Д. К. Экспериментальные методы и теоретические модели в физике неравновесной плазмы. — Ф.: Илим, 1988.
146. Van Regemorter A. // Astrophys. J. 1962. Vol. 132. P. 906.
147. Drawin H. W., Emard F. // Physica. 1977. Vol. 85. No. 2. P. 333.
148. Ralchenko Yu., Kramida A. E., Reader J., and NIST ASD Team (2010). NIST Atomic Spectra Database (ver. 4.0.1), (Online). Available: <http://physics.nist.gov/asd>

149. Радциг А. А., Смирнов Б. М. Параметры атомов и атомных ионов: Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
150. Буреева Л. А. В кн. «Энциклопедия низкотемпературной плазмы», Серия Б, Справочные приложения, Базы и Банки Данных, Т. V-1, Диагностика низкотемпературной плазмы, Часть II, Под ред. В. Н. Колесникова. — М.: Янус-К, 2007.
151. Sansonetti J. E., Martin W. C. // J. Phys. Chem. Ref. Data 2005. Vol. 34. P. 1560.
152. Бабичев А. П., Бабушкина А. М., Братковский А. М. и др. Физические величины: Справочник. Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
153. Бете Г., Солтупер Э. Квантовая механика атомов с одним и двумя электронами. — М.: Гос. Изд. Физико-матем. Литературы, 1960.
154. Wiese W., Smith M., Glennon B. Atomic Transition Probabilities, NBS. 1966.
155. Грим Г. Спектроскопия плазмы. Перев. с англ. — М.: Атомиздат, 1969.
156. Демтредер В. Лазерная спектроскопия: Основные принципы и техника эксперимента. — М.: Наука, 1985.
157. Очкин В. Н. Спектроскопия низкотемпературной плазмы. — М.: Физматлит, 2006.
158. Толстихина Л. А., Шевелько В. П. В кн. «Энциклопедия низкотемпературной плазмы», Серия Б, Справочные приложения, Базы и Банки Данных, Т. V-1, Диагностика низкотемпературной плазмы, Часть II, Под ред. В. Н. Колесникова. — М.: Янус-К, 2007.
159. Авакян С. В., Ильин Р. Н., Лавров В. М., Огурцов Г. Н. Сечения процессов ионизации и возбуждения УФ излучения при столкновениях электронов, ионов и фотонов с атомами и молекулами атмосферных газов. Справочник. СПб.: Гос. Оптический ин-т им. С. В. Вавилова, 2000.
160. Peterkop R. K. // Sov. Phys. JETP. 1962. Vol. 14. P. 1377.
161. Peterkop R. K. // Sov. Phys. Opt. Spectr. 1962. Vol. 13. P. 87.

## Analysis of the data on cross sections of excitation of electronic states and ionization of hydrogen atom by electron impact (a review)

V. A. Shakhmatov and Yu. A. Lebedev

A. V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis of the Russian Academy of Science  
29 Leninskii prospect, Moscow, 119991, Russia  
E-mail: shakhmatov@ips.ac.ru

Received October 12, 2016

*Consideration is given to a review and analysis of the inelastic cross sections of ionization, excitation and de-excitation of the hydrogen atom, resulting in both experiments and by calculation. This review creates the database of the inelastic cross sections that it is needed to use in the calculation of the electron energy distribution function and determination of the level-to-level rate coefficients required in the solving of balance equations for concentrations of neutral and charged particles in hydrogen plasma.*

PACS: 52.70.Kz; 52.25.Os; 52.55.Dy; 52.70.-m

*Keywords:* hydrogen atom, cross section, ionization, excitation, electronic state, plasma, data base.

### REFERENCES

- V. A. Shakhmatov, Yu. A. Lebedev, A. Lacoste, S. Bechu. High Temperature **54**, 467 (2016).
- A. Lacoste, S. Bechu, Yu. A. Lebedev, V. A. Shakhmatov, in *Abstracts of Papers of the XLIII International (Russia, Zvenigorod, Moscow Region, February 11–15, 2016) Conference on Plasma Physics and Controlled Thermonuclear Fusion*, (Moscow: MBA, 2016.) P. 207.
- S. Bechu, A. Lacoste, Yu. A. Lebedev, V. A. Shakhmatov, in *Proceedings of the IX International Workshop on Microwave Discharges: Fundamentals and Applications* (Cordoba, Spain, September 7–11, 2015) Cordoba: Cordoba University, 2015. P. 32.
- S. Béchu, S. Aleiferis, P. Svarnas, V. A. Shakhmatov, Yu. A. Lebedev, et al., in *Proceedings of the 22nd International Symposium on Plasma Chemistry* (ISPC 22, Belgium, Antwerp, July 5–10 2015) Antwerp: Antwerp University, 2015. P. 78.
- S. Bechu, A. Lacoste, Yu. A. Lebedev, V. A. Shakhmatov, Prikl. Fiz., No. 2, 45 (2015).
- V. A. Shakhmatov, Yu. A. Lebedev, Usp. Prikl. Fiz., No. 3, 21 (2015).
- V. A. Shakhmatov, Yu. A. Lebedev, Usp. Prikl. Fiz., No. 2, 571 (2014).
- K. A. Vereshchagin, O. A. Gordeev, V. V. Smirnov, V. A. Shakhmatov, In book: *Raman Scattering — 80 Years of the Investigations*. (Moscow: FIAN, 2009) [in Russian].
- V. A. Shakhmatov, Yu. A. Lebedev, A. Lacoste, S. Bechu, High Temperature **54**, 120 (2016).
- V. A. Shakhmatov, Yu. A. Lebedev, A. Lacoste, S. Bechu, High Temperature **53**, 569 (2015).
- Yu. A. Lebedev, V. A. Shakhmatov, A. Lacoste, S. Bechu, in *Proceedings of VII Int. Symposium on Pure and Applied Plasma Chemistry* (ISTAPC-2014, Russia, Ploys, Ivanovo Region, 2014) Ivanovo: Ivanovo State University, 2014. P. 46.

12. Yu. A. Lebedev, V. A. Shakhmatov, A. Lacoste, S. Bechu, in *Proceedings of the 10th International Conference. Mesh methods for boundary-value problems and applications* / Ed. Badriev I. B. (main editor), Ablav F. M., Gulina A. V., Zeltukhin V. S., Karchevskii M. M., Fedotov E. M., Chetverushkin B. N., — Kazan: Otechestvo, 2014. P.703.
13. V. A. Shakhmatov, Yu. A. Lebedev, *High Temperature* **49**, 257 (2011).
14. Yu. A. Lebedev, V. A. Shakhmatov, in *Proceedings of VI Int. Symposium on Pure and Applied Plasma Chemistry* (ISTAPC-2011, Russia, Ivanovo, 2011) Ivanovo: Ivanovo State University, 2011. P. 157.
15. Yu. A. Lebedev, V. A. Shakhmatov, in *Proceedings of VI Int. Symposium on Pure and Applied Plasma Chemistry* (ISTAPC-2011, Russia, Ivanovo, 2011) Ivanovo: Ivanovo State University, 2011. P. 154.
16. Yu. A. Lebedev, V. A. Shakhmatov, in *Proceedings of VI Int. Symposium on Pure and Applied Plasma Chemistry* (ISTAPC-2011, Russia, Ivanovo, 2011) Ivanovo: Ivanovo State University, 2011. P. 150.
17. Yu. A. Lebedev, V. A. Shakhmatov In book: *Encyclopedia of Low—Temperature Plasma: Optics of Low—Temperature Plasma*, Ed. by Ochkin V. N. (Moscow: Yanus-K, 2009), vol. IX-3.
18. V. A. Shakhmatov, O. A. Gordeev, *Optics and Spectroscopy* **103**, 468 (2007).
19. V. A. Shakhmatov, Doctoral (Phys.-Math.) Dissertation, Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2016.
20. *Atomic and Molecular Processes*. Ed. Beits D. (Moscow: Mir, 1964). [in Russian].
21. D. Hasted, *Physics of Atomic Collisions*. (Moscow: Mir, 1965) [in Russian].
22. B. M. Smirnov, *Atomic Collisions and Elementary Processes in Plasma*. (Moscow: Atomizdat, 1968) [in Russian].
23. B. M. Smirnov, *Ions and Excited Atoms in Plasma*. (Moscow: Atomizdat, 1974) [in Russian].
24. M. Mitchner, H. Kruger, *Partially Ionized Gases*. (John Wiley, 1973).
25. D. I. Slovetskii, *Mechanisms of Chemical Reactions in Non-Equilibrium Plasmas*, (Moscow: Nauka, 1980) [in Russian].
26. L. M. Biberman, V. S. Vorobyev, I. T. Yakubov, *Kinetics of nonequilibrium low-temperature plasma*. (Moscow: Nauka, 1982) [in Russian].
27. R. K. Janev, W. D. Langer, K. Evans, D.E. *Post Elementary Processes in Hydrogen — Helium Plasmas. Volume 4. Cross Sections and Reaction Rate Coefficients*. (Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo: Springer-Verlag, 1987).
28. I. A. Semiohin, *Elementary processes in low temperature plasma*. (Moscow: Lomonosov Moscow State University, 1988) [in Russian].
29. Yu. S. Protasov, S. N. Chuvashov, In book: *Encyclopedia of Low—Temperature Plasma: Introductory Volume*, Ed. by Fortov V. E. (Moscow: Nauka / Interperiodika, 2000) vol. I [in Russian].
30. A. V. Eletsckii, B. M. Smirnov, In book: *Encyclopedia of Low—Temperature Plasma: Introductory Volume*, Ed. by Fortov V. E. (Moscow: Nauka / Interperiodika, 2000), vol. I [in Russian].
31. *A Handbook of Elementary Process Constants Involving Atoms, Ions, Electrons, Photons*. Ed. Jiglinskii A. G. (St. Petersburg: St. Petersburg State University, 1994) [in Russian].
32. R. K. Janev, D. Reiter, U. Samm In book: *Encyclopedia of Low—Temperature Plasma: Databases and Data, Part II*, Ed. Kolesnikov V.N. (Moscow: Yanus-K, 2007), vol. V-1 [in Russian].
33. R. K. Janev, Atomic and Plasma-Material Interaction Data for Fusion. **9**, 1 (2001).
34. V. S. Lebedev, In book: *Encyclopedia of Low—Temperature Plasma: Databases and Data, Part II*, Ed. Kolesnikov V. N. (Moscow: Yanus-K, 2007), vol. V-1 [in Russian].
35. *Physicochemical Processes in Gas Dynamics: Vol. 1. Dynamics of Physicochemical Processes in Gases and Plasmas*, Chernyi G. G., Losev S. A., Eds, (Moscow: Nauchnyi Mir, 2007) [in Russian].
36. L. Marques, J. Jolly, L. L. Alves, *J. Appl. Phys.* **102**, 063305 (2007).
37. L. A. Weinstein, I. I. Sobel'man, E. A. Yukov, *Excitation of atoms and broadening of spectral lines*, (Moscow: Nauka, 1979) [in Russian].
38. L. A. Vainshtein, V. P. Shevel'ko, *Structure and Characteristics of Ions in Hot Plasma*, (Moscow: FizMatLit, 1986) [in Russian].
39. E. E. Nikitin, B. M. Smirnov, *Atomic and Molecular Processes: Problems with Solutions* (Moscow: Nauka, 1988) [in Russian].
40. G. F. Drukarev, *Collisions of Electrons with Atoms and Molecules*, (Moscow: Nauka, 1978) [in Russian].
41. M. K. Gailitis, *Sov. UFN*, **116**, 665 (1975).
42. H. S. W. Massey, *Reviews of Modern Phys.* **28**, 199 (1956).
43. I. I. Sobel'man, Introduction to the Theory of Atomic Spectra. (Moscow: FizMatLit, 1963) [in Russian].
44. B. I. Moiseiwitsch, S. J. Smith, *Reviews of Modern Physics.* **40**, 238 (1968).
45. V. Veldre, I. Vinkalns, In book: *Atomic Collisions*, (Riga: Izd-vo Akad. Nauk. Latv. S.S.R., 1965) [in Russian].
46. M. B. Shah, D. S. Elliott, H. B. Gilbody, *J. Phys. B* **20**, 3501 (1987).
47. Y.-K. Kim, M. E. Rudd, *Phys. Rev. A* **50**, 3954 (1994).
48. M. Gryzinski, *Phys. Rev. A* **138**, 305 (1965).
49. M. Gryzinski, *Phys. Rev. A* **138**, 322 (1965).
50. M. Gryzinski, *Phys. Rev. A* **138**, 336 (1965).
51. S. M. Younger, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* **26**, 329 (1981).
52. W. L. Fite, R. T. Brackmann, *Phys. Rev.* **112**, 1141 (1958).
53. J. J. Thomson, *Phil. Mag.* **23**, 449 (1912).
54. H. W. Drawin, *Z. Physik.* **164**, 513 (1961).
55. W. Lotz, *Zs. Physik. B* **216**, 241 (1968).
56. M. R. H. Rudge, *Rev. Mod. Phys.* **40**, 564 (1968).
57. P. G. Burke, A. J. Taylor, *Proc. Roy. Soc. (London).* **A 273**, 372 (1965).
58. E. W. Rothe, L. L. Marino, R. H. Neynaber, S. M. Trujillo, *Phys. Rev.* **125**, 582 (1962).
59. S. Geltman, M. R. H. Rudge, M. J. Seaton, *Proc. Phys. Soc. (London).* **81**, 375 (1963).
60. M. R. H. Rudge, S. B. Schwartz *Proc. Phys. Soc. (London).* **88**, 563 (1966).
61. V. I. Ochkur, *Sov. Phys. JETP.* **20**, 1175 (1965).
62. J. A. Michael, PhD. Thesis. (Ohio: Case Institute of Technology, 1963).
63. R. C. Stabler, *Phys. Rev. A* **133**, 1268 (1964).
64. T. W. Shyn, *Phys. Rev. A* **47**, 2951 (1992).
65. J. W. McGowan, E. M. Clarke, *Phys. Rev.* **167**, 43 (1968).
66. A. Boksenburg, PhD. Thesis. (London: University College, 1960).
67. I. C. Percival, N. A. Valentine, *Proc. Phys. Soc. (London).* **88**, 885 (1966).
68. R. Abrines, I.C. Percival, *Proc. Phys. Soc. (London).* **88**, 861 (1966).
69. A. Burgess, Research Report A.E.R.E. R 4818 (Proceedings of the Culham Symposium). 1964.

70. P. G. Burke, H. M. Schey, K. Smith, *Phys. Rev.* **129**, 446 (1963).
71. P. G. Burke, S. Ormonde, W. Whitaker, *Proc. Phys. Soc. (London)*. **92**, 319 (1967).
72. J. Callaway, K. Unnikrishnan, *Phys. Rev. A* **48**, 4292 (1993).
73. J. Callaway, K. Unnikrishnan, D.H. Oza, *Phys. Rev. A* **36**, 2576 (1987).
74. F. J. De Heer, M. R. C. McDowell, R. W. Wagenaar, *J. Phys. B* **10**, 1945 (1977).
75. M. M. Felden, M. A. Felden, *Astrophys. J.* **174**, 219 (1972).
76. M. R. Flannery, K. J. McCam, *J. Phys. B* **7**, L522 (1974).
77. A. H. Mahan, A. Gallagher, S. J. Smith, *Phys. Rev.* **13**, 156 (1976).
78. G. C. McCoyd, S. N. Milford, J. J. Wahl, *Phys. Rev.* **119**, 149 (1960).
79. M. McDowell, R. Syms, L. Morgan, V. Myerscough, in *Proc. Tenth International Conference on the Physics of Electronic and Atomic Collisions: Invited Papers and Progress Reports*. (Amsterdam: North-Holland Company, 1975). P. 185.
80. A. A. Mityureva, V. V. Smirnov, *Optics and Spectroscopy*. **101**, 338 (2006).
81. D. J. T. Morrison, M. R. H. Rudge, *Proc. Phys. Soc. (London)*. **89**, 45 (1966).
82. W. B. Somerville, *Proc. Phys. Soc. (London)*. **82**, 446 (1963).
83. C. T. Whelan, M. R. C. McDowell, P. W. Edmunds, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **20**, 1587 (1987).
84. J. F. Williams, P. I. Barlett, I. Bray, A. T. Stelbovics, A. G. Mikosza, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **39**, 719 (2006).
85. L. A. Vainstein, *Opt. Spectrosk.* **11**, 301 (1961).
86. L. C. Johnson, *Astrophys. J.* **174**, 227 (1972).
87. K. L. Bell, B. L. Moiseiwitsch, *Proc. R. Soc. (London)*. **276**, 346 (1963).
88. R. V. Calhoun, D. H. Madison, W. N. Shelton, *Phys. Rev. A* **14**, 1380 (1976).
89. J. Callaway, *Phys. Rev. A* **32**, 775 (1985).
90. D. H. Sampson, L. B. Golden, *Ap. J.* **161**, 321 (1970).
91. W. L. Fite, R. T. Brackmann, *Phys. Rev.* **112**, 1151 (1958).
92. W. C. Fon, K. M. Aggarwal, K. Ratnavelu, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **25**, 2625 (1992).
93. M. Galitis, R. Damburg, *Proc. Phys. Soc.* **82**, 192 (1963).
94. M. Galitis, R. Damburg, *Proc. Phys. Soc. Lett. To Editors*. **82**, 1068 (1963).
95. J. N. Gau, J. Macek, *Phys. Rev. A* **12**, 1760 (1975).
96. F. W. Byron, *Phys. Rev. A* **4**, 1907 (1971).
97. H. Tai., R.H. Bassel, E. Gerjuoy, V. Franco, *Phys. Rev. A* **1**, 1819 (1970).
98. S. Geltman, P.G. Burke, *J. Phys. B: Atom. Molec. Phys.* **3**, 1062 (1970).
99. J. W. McGowan, J. F. Williams, E. K. Curley, *Phys. Rev. A* **180**, 132 (1969).
100. W. L. Fite, R.F. Stebbings, R.T. Brackmann, *Phys. Rev.* **116**, 356 (1959).
101. V. M. Burke, M. J. Seaton, *Proc. Phys. Soc.* **77**, 199 (1961).
102. S. Khashaba, H. S. W. Massey, *Proc. Phys. Soc.* **71**, 574 (1958).
103. A. E. Kingston, W.C. Fon, P.G. Burke, *J. Phys. B: Atom. Molec. Phys.* **9**, 605 (1976).
104. K. Omidvar, *Phys. Rev. A* **133**, 970 (1964).
105. A. E. Kingston, J. E. Lauer, *Proc. Phys. Soc. (London)*. **87**, 399 (1966).
106. A. E. Kingston, J. E. Lauer, *Proc. Phys. Soc. (London)*. **88**, 597 (1966).
107. R. McCarroll, *Proc. Phys. Soc. (London)*. **A 70**, 460 (1957).
108. M. J. Seaton, *Proc. Phys. Soc. (London)*. **79**, 1105 (1964).
109. H. E. Saraph, *Proc. Phys. Soc.* **83**, 763 (1964).
110. A. Burgess In book: *Atomic Collision Processes*, Ed. by McDowell M.R.C. (Amsterdam: North-Holland Publ. Co., 1964). P. 237.
111. A. Burgess, in *Proc. Third International Conference on Physics of Electronic and Atomic Collisions* (England, London, 22–26 July, 1963). Amsterdam: North-Holland Publ. Co., 1963. P. 238.
112. K. Omidvar, *Phys. Rev. A* **140**, 38 (1965).
113. W. L. Van Wyngaarden, H. R. J. Walters, *J. Phys. B: At. Mol. Phys.* **19**, L53 (1986).
114. A. J. Taylor, P. G. Burke, *Proc. Phys. Soc.* **92**, 336 (1967).
115. R. Marriot, *Proc. Phys. Soc.* **72**, 121 (1958).
116. W. Lichten, *Phys. Rev. Lett.* **6**, 12 (1961).
117. R. F. Stebbings, W. L. Fite, D. G. Hummer, R. T. Brackmann, *Phys. Rev.* **119**, 1939 (1960).
118. D. Hils, H. Kleinpoppen, H. Koschmieder, *Proc. Phys. Soc.* **89**, 35 (1966).
119. H. Koschmieder, V. Raible, H. Kleinpoppen, *Phys. Rev. A* **8**, 1365, (1973).
120. S. B. Elston, S. A. Lawton, F. M. T. Pichanick, *Electronic and Atomic Collisions IX ICPEAC, Abstracts of Papers*, (1975, Seattle).
121. L. A. Veinstein, *Opt. and Spectr.* **18**, 538 (1965).
122. R. V. Calhoun, D. H. Madison, W. N. Shelton, *Phys. Rev. A* **14**, 1380 (1976).
123. W. Kauppila, W. R. Ott, W. L. Fite, *Phys. Rev. A* **1**, 1099 (1970).
124. A. Grafe, C. J. Sweeney, T. W. Shyn, *Phys. Rev. A* **64**, 032704-1, (2001).
125. A. Grafe, C. J. Sweeney, T. W. Shyn, *Phys. Rev. A* **63**, 052715-1, (2001).
126. D. G. Hummer, M. J. Seaton, *Phys. Rev. Lett.* **6**, 471 (1961).
127. A. E. Kingston, B. L. Moiseiwitsch, B. G. Skinner, *Proc. R. Soc. (London)*. **258**, 245 (1960).
128. K. Smith // *Phys. Rev.* **120**, 845 (1960).
129. D. R. Bates, A. E. Kingston, R. W. McWhirter, *Proc. Roy. Soc. (London)*. **A 267**, 297 (1962).
130. P. G. Burke, T. G. Webb, *J. Phys. B: Atom. Mol. Phys.* **3**, L131 (1970).
131. R. L. Long, D. M. Cox, S. J. Smith, *J. Res. N.B.S. A* **72**, 521 (1968).
132. L. C. Johnson, E. Hinnov, *Phys. Rev.* **187**, 143 (1969).
133. A. Oed, *Phys. Lett. A* **134**, 435 (1971).
134. G. A. Erskine, H. S. W. Massey, *Proc. Roy. Soc. (London)*. **A 212**, 521 (1952).
135. V. I. Ochkur, *Vest. Leningr. Univ. Ser. Fiz. i. Khim.* **4**, 53 (1958).
136. K. Smith, W. F. Miller, A. J. P. Mumford, *Proc. Phys. Soc. (London)*. **76**, 559 (1960).
137. K. Bhadra, A. S. Ghosh, *Phys. Rev. Lett.* **26**, 737 (1971).
138. D. R. Bates, *Proc. Roy. Soc. (London)*. **A 270**, 155 (1962).
139. H. Kleinpoppen, E. Kraiss, *Phys. Rev.* **20**, 361 (1967).

140. M. McDowell, V. Myerscough, U. Narian, *J. Phys. B* **7**, L195 (1974).
141. G. C. McCoyd, S. N. Milford, *Phys. Rev.* **130**, 206 (1963).
142. W. Lichten, S. Schulz, *Phys. Rev.* **116**, 1132 (1959).
143. R. C. Stabler, *Phys. Rev. A* **133**, 1268 (1964).
144. K. L. Bell, *Proc. Phys. Soc. (London)*. **86**, 246 (1965).
145. V. M. Lelevkin, D. K. Otorbaev, *Experimental methods and theoretical models in the physics of non-equilibrium plasma*. (Frunze: Ilim, 1988) [in Russian].
146. A. Van Regemorter, *Astrophys. J.* **132**, 906 (1962).
147. H. W. Drawin, F. Emard, *Physica*. **85**, 333 (1977).
148. Yu. Ralchenko, A. E. Kramida, J. Reader, and NIST ASD Team (2010). NIST Atomic Spectra Database (ver. 4.0.1), (Online). Available: <http://physics.nist.gov/asd>
149. A. A. Radzig, B. M. Smirnov, *Parameters of atoms and atomic ions: Handbook. 2-e Izd.*, (Moscow: EnergoAtomizdat, 1986) [in Russian].
150. L. A. Bureeva, In book: *Encyclopedia of Low—Temperature Plasma: Databases and Data, Part II*, Ed. by Kolesnikov V. N. (Moscow: Yanus-K, 2007), vol. V-1 [in Russian].
151. J. E. Sansonetti, W. C. Martin, *J. Phys. Chem. Ref. Data*. **34**, 1560 (2005).
152. A. P. Babichev, A. M. Babushkina, A. M. Bratkovsky and et. al. *Physical quantities: Reference book*. Ed. by I. S. Grigoriev, E. Z. Meylikhova, (Moscow: Energoatomizdat, 1991) [in Russian].
153. G. Bete, E. Solpiter, *Quantum mechanics of atoms with one and two electrons*. (Moscow: State. Ed. Physical — Mat. Literature, 1960) [in Russian].
154. W. Wiese, M. Smith, B. Glennon, *Atomic Transition Probabilities*, (NBS. 1966).
155. G. Grime, *Plasma Spectroscopy*. (Moscow: Atomizdat, 1969) [in Russian].
156. V. Demtroder, *Laser Spectroscopy: Basic principles and Experimental Techniques*. (Moscow: Nauka, 1985) [in Russian].
157. V. N. Ochkin, *Spectroscopy of low temperature plasma*. (Moscow: Fizmatlit, 2006) [in Russian].
158. A. L. Tolstikhina, V. P. Shevel'ko, In book: *Encyclopedia of Low—Temperature Plasma: Databases and Data, Part II*, Ed. by Kolesnikov V. N. (Moscow: Yanus-K, 2007), vol. V-1 [in Russian].
159. S. V. Avakyan, R. N. Il'in, V. M. Lavrov, G. N. Ogurtsov, *The cross sections for the processes of ionization and excitation of UV emission in collisions of electrons, ions and photons with atoms and molecules of atmospheric gases. Reference*. S(Pb.: State. Optical in-t im. S. V. Vavilov, 2000) [in Russian].
160. R. K. Peterkop, *Sov. Phys. JETP*. **14**, 1377 (1962).
161. R. K. Peterkop, *Sov. Phys. Opt. Spectr.* **13**, 87 (1962).