

## УТОЧНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НЕУСТОЙЧИВЫХ ИОНОВ $D_2^-$ И $HD^-$

© 2023 г. А. А. Терентьев\*

Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

\*e-mail: Terentev\_AA@nrcki.ru

Поступила в редакцию 14.10.2022 г.

После доработки 06.12.2022 г.

Принята к публикации 29.12.2022 г.

Повторной обработкой уточнены результаты измерения времени жизни отрицательных молекулярных ионов  $D_2^-$  и  $HD^-$ : время жизни иона  $D_2^-$  равно  $3.9 \pm 0.1$  мкс, а иона  $HD^-$  —  $4.6 \pm 0.1$  мкс. Уточнены значения энергии пучка, при которой проводились измерения. Показано, что результаты измерения делятся на две группы, внутри которых время жизни для ионов  $D_2^-$  и  $HD^-$  совпадает с хорошей точностью.

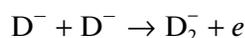
*Ключевые слова:* водород, дейтерий, ион, отрицательный, молекулярный, время жизни, период полураспада

**DOI:** 10.31857/S0367292122601308, **EDN:** FKLDND

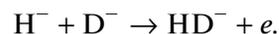
В работе [1] были представлены результаты измерения времени жизни отрицательных молекулярных ионов  $D_2^-$  и  $HD^-$  в основном состоянии. Как выяснилось позже, при проведении экспериментов и при обработке результатов был допущен ряд неточностей. Это не перечеркивает основного результата работы — время жизни указанных ионов в основном состоянии намного больше, чем время жизни автоотрывного состояния. В этой статье рассмотрены упомянутые неточности и подправлены результаты [1]. При этом новых измерений не проводилось, использовались только результаты [1].

На рис. 1 приведена схема установки ДИВО. Ионы, выходящие из источника магнетронного типа ИИ, ускоряются до энергии  $U_{\text{уск}}$  и попадают в магнит-монохроматор ММ с магнитным полем  $B_{\text{ММ}}$ , который выделяет компоненту нужной массы. Затем пучок проходит через систему формирования пучка СФП (две квадрупольных линзы и два корректирующих конденсатора — вертикальный и горизонтальный), где он дофокусируется и попадает в измерительную часть установки. Здесь пучок проходит  $180^\circ$  электростатический анализатор ЭА с напряжением  $U_{\text{ЭА}}$ , из которого он направляется в петлю П и через фильтр Ф в ВЭУ.

Молекулярные ионы образовывались в источнике в результате реакций



и



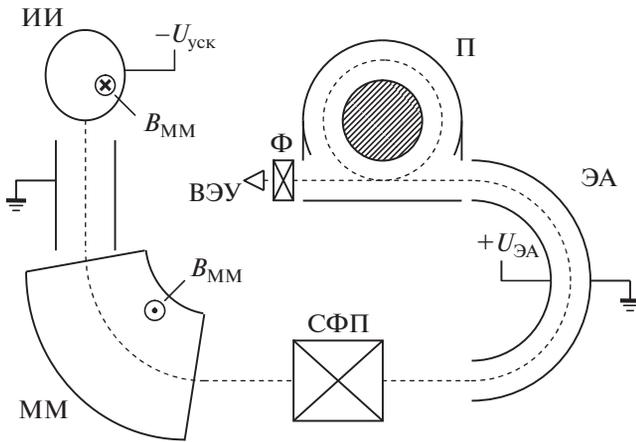
Пучок ионов проходил петлю П либо по прямой, либо по круговой траектории, разница в длинах траекторий составляла 270 мм. При этом интенсивность пучка, попадающего в ВЭУ, менялась с  $N_1$  до  $N_2$ , а разница времени прохождения ионов по тракту  $\Delta t$  зависела от энергии пучка. Время жизни  $\tau$  определялось выражением

$$\tau = \frac{\Delta t}{\ln(N_1/N_2)}$$

Эксперименты проводились сериями, сначала для  $D_2^-$  при разных энергиях извлекаемых из источника ионов, а затем для  $HD^-$ . В каждой серии вычислялось время жизни  $\tau$ , которое затем усреднялось для каждой энергии и типа иона для разных серий. Надо иметь в виду, что чем больше время жизни иона, тем больше времени требуется на набор статистики при неизменном режиме работы установки. Исходя из имевшихся ресурсов, верхний предел измерения  $\tau$  составлял 100–200 мкс.

Сначала хотелось бы рассказать об одной особенности проводимых в [1] измерений.

В измерениях для  $D_2^-$  было получено значительное количество серий, в которых время жизни оказывалось чрезмерно большим, а погрешность измерений составляла сотни процентов. Часто бывало, что в начале серии получалось вполне корректное значение  $\tau$ , а начиная с неко-



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: ИИ — ионный источник, ММ — магнит-монохроматор, СФП — система фокусировки пучка, ЭА — электростатический анализатор с пространственной фокусировкой, П — петля (360-градусный анализатор с пространственной фокусировкой), Ф — цилиндрический фокусирующий фильтр, ВЭУ — вторичный электронный умножитель.

торого момента счеты  $N_1$  и  $N_2$  становились примерно равными. Такие серии считались бракованными и в окончательные результаты не вошли.

В каждой серии было по 90 измерений, кроме тех серий, которые были прерваны по техническим причинам, например, из-за перегорания нити накала источника. На самом деле, количество измерений не имеет никакого значения. Значение имеет общее время измерения — 3–4 часа, а основное значение имеет общее количество зарегистрированных частиц (счетов) в серии, которое составляло 40–150 тыс. счетов в серии (по каждому из измерений  $N_1$  и  $N_2$ ).

Для  $\text{HD}^-$  наблюдалось другое. Часто при настройке установки на  $\text{HD}^-$  счетов не было вовсе. Также счеты могли внезапно пропасть посреди серии.

Во всех таких случаях можно было перенастроить установку и обнаружить пучок  $\text{D}^-$ , по которому всегда проводилась первичная настройка измерительного тракта. Параметры этого пучка не изменялись в пределах точности настройки.

Наблюдаемые значения можно объяснить тем, что в какой-то момент молекулярные ионы перестают образовываться в источнике. При этом  $\text{D}_2^-$  сопровождаются некой долгоживущей, возможно, стабильной компонентой. Какие условия влияют на образование ионов, выяснить не удалось. Режим работы источника оставался тем же в пределах разброса настроек, изменением параметров его работы восстановить образование

ионов не удалось ни разу. Выяснить природу долгоживущей компоненты также не удалось.

Вообще, процессы, идущие в источнике, оказались не так очевидны, как считалось. Их влияние на ход измерений еще придется исследовать.

Теперь можно перейти к коррекции результатов обработки [1]. Во-первых, в измерениях для  $\text{D}_2^-$  при энергии 950 эВ есть серии с очень большой погрешностью. Удаление любой из них приводит к уменьшению общей погрешности. Во время проведения этих серий параметры работы установки были очень неустойчивы по техническим причинам, что дало большой статистический разброс в результатах измерений. Эти серии было решено исключить из окончательных результатов.

Во-вторых, хочется рассмотреть точность определения энергии пучка  $E_0$ . Здесь надо отметить, что  $E_0$  в [1] не является сильно значимым фактором. Она определяет лишь время движения частиц по тракту установки. Вот в работе [2], где использовался метод расщепленного пучка,  $E_0$  определяла энергию взаимодействия исходных ионов. Здесь же эта энергия определялась внутренними параметрами ионного источника.

В используемой схеме измерения  $E_0$  можно определить тремя способами:

- по значению ускоряющего напряжения  $U_{\text{уск}}$ ;
- по значению магнитного поля в магните-монохроматоре  $B_{\text{ММ}}$ ;
- по значению напряжения на электростатическом анализаторе  $U_{\text{ЭА}}$ .

При обработке результатов в [1] в качестве  $E_0$  принималось значение  $U_{\text{уск}}$ . Но, поскольку ионы выходят изнутри источника, они начинают ускоряться еще в электрическом поле разряда и получают некоторую часть разрядного напряжения. Таким образом, энергия ионов на входе в магнит-монохроматор будет больше  $U_{\text{уск}}$ . Определить эту прибавку энергии затруднительно, поскольку неизвестны ни область, из которой выходят ионы, ни распределение электрического поля внутри источника. Напряжение разряда в экспериментах [1] составляло 50–100 В и не регистрировалось.

Значение  $B_{\text{ММ}}$  тоже нельзя считать надежным источником для определения  $E_0$ . Дело в том, что ионы выходят из источника не по радиусу цилиндра-катода, а имеют некоторое распределение по направлениям, которое неизвестно. Кроме того, они отклоняются в рассеянном поле магнита источника  $B_{\text{ИИ}}$ . Поскольку направление движения ионов на входе в магнит-монохроматор неизвестно, точно определить  $E_0$  по значению  $B_{\text{ММ}}$  невозможно.

**Таблица 1.** Средние значения  $E_0$  для использованных  $U_{\text{уск}}$

Ион	$D_2^-$			$HD^-$
	800	950	1200	
$U_{\text{уск}}, \text{В}$	800	950	1200	950
$E_0, \text{эВ}$	670	850	1020	850

Электростатический анализатор оказался наиболее удобным средством для определения  $E_0$ . Пучок частиц на его входе хорошо сформирован и имеет угловой разброс меньше  $1^\circ$ . Геометрия коллиматорных щелей (на рис. 1 не показаны) обеспечивает попадание пучка на рабочую траекторию анализатора. Сам анализатор использовался во многих предыдущих экспериментах, многократно проверен, и хорошо известно, что для прохождения через него частиц с энергией 1 кэВ, необходимо иметь  $U_{\text{ЭА}} = 1250 \text{ В}$ . Измерения  $U_{\text{ЭА}}$  велись с точностью  $\pm 2.5 \text{ В}$  и регистрировались.

Было принято решение повторно обработать результаты [1], считая характеристикой энергии ионов значение  $U_{\text{ЭА}}: E_0 = U_{\text{ЭА}}/1.25$ .

Сначала определялось значение  $E_0$  в каждой серии экспериментов. Усредненные значения приведены в табл. 1. Далее в тексте используются скорректированные значения  $E_0$ .

Оказалось, что  $E_0$  в экспериментах была меньше  $U_{\text{уск}}$ . Это невозможно объяснить неупругими потерями энергии, например, при рассеянии на остаточном газе – рассеянные ионы неизбежно покинули бы рабочую траекторию установки. Можно предложить два объяснения: либо молекулярные ионы выходят из области в источнике, имеющей потенциал меньше  $U_{\text{уск}}$ , либо они образуются вне источника, в пучке вышедших из него исходных ионов  $D^-$ . Проверка этих предположений требует отдельного исследования и выходит за рамки данной статьи.

При повторной обработке также обнаружилось, что иногда меньшему значению  $E_0$  соответ-

ствовало большее значение  $V_{\text{мм}}$ . Причина этого, видимо, в том, что между сериями производилась подстройка установки. При этом менялось угловое распределение выходящих из источника ионов.

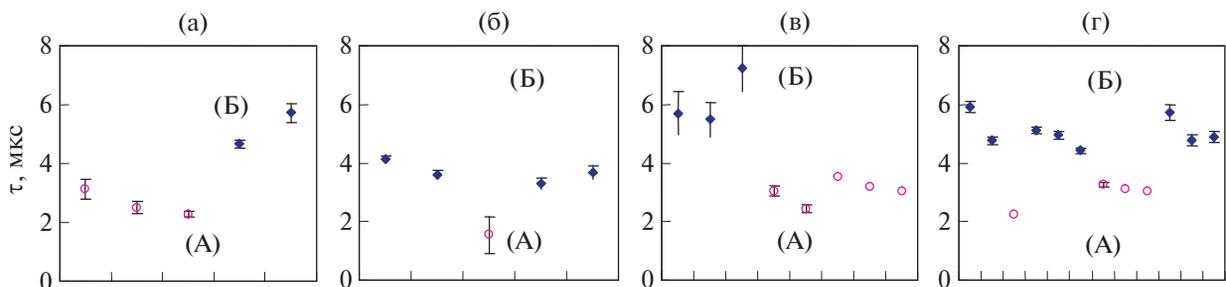
После определения энергии ионов было вычислено время их прохождения по петле  $\Delta t$  так же, как и в [1] при помощи программы SIMION 7.0 [3], а затем и время жизни  $\tau$  для каждой серии. Результаты показаны на рис. 2, серии приведены в порядке их получения. В целом время жизни оказывается примерно на 10% больше, указанного в [1].

После этого было усреднено время жизни для каждого значения энергии  $D_2^-$  и для каждого типа иона.

Исправленные результаты для  $D_2^-$  следующие:  $4.06 \pm 0.09 \text{ мкс}$  (для 670 эВ),  $3.84 \pm 0.12 \text{ мкс}$  (для 850 эВ) и  $3.81 \pm 0.06 \text{ мкс}$  (для 1020 эВ). Среднее значение времени жизни  $\tau = 3.9 \pm 0.1 \text{ мкс}$ .

Для иона  $HD^-$  время жизни составляет  $\tau = 4.6 \pm 0.1 \text{ мкс}$ .

И последнее, на что хотелось бы обратить внимание. На рис. 2г показаны значения времени жизни  $HD^-$  для всех серий. Хорошо видно, что они делятся на две группы: (А) с меньшим значением  $\tau$  и (Б) с большим. Тот же эффект наблюдается для  $D_2^-$  при  $E_0 = 1020 \text{ эВ}$  (рис. 2в). Для энергий 670 и 850 эВ эффект выражен слабее, но при желании его можно увидеть и здесь (рис. 2а, б). Можно вычислить средние значения  $\tau$  и дисперсии для каждой группы. Результат приведен в табл. 2. Легко видеть, что разница в средних значениях  $\tau$  групп А и Б для  $D_2^-$  и  $HD^-$  ( $\sim 2 \text{ мкс}$ ) сильно превышает три стандартных отклонения ( $\sim 0.3 \text{ мкс}$ ). Это позволяет утверждать, что группы относятся к разным измеряемым величинам, или к двум разным процессам, идущим в установке. Но главное, хорошо видно, что значения  $\tau$  в каждой группе для  $D_2^-$  и  $HD^-$  совпадают с хорошей точностью.



**Рис. 2.** Значения времени жизни  $\tau$  для каждой серии измерений:  $D_2^-$ , 670 эВ (а),  $D_2^-$ , 850 эВ (б),  $D_2^-$ , 1020 эВ (в),  $HD^-$ , 850 эВ (г).

**Таблица 2.** Время жизни  $\tau$ , мкс, для двух групп серий измерений

Группа	$D_2^-$				$HD^-$
	670 эВ	850 эВ	1020 эВ	Среднее	850 эВ
(А)	$2.49 \pm 0.09$	$1.54 \pm 0.62$	$3.03 \pm 0.08$	$2.81 \pm 0.1$	$3.01 \pm 0.04$
(Б)	$4.97 \pm 0.13$	$3.37 \pm 0.14$	$6.22 \pm 0.4$	$5.03 \pm 0.11$	$5.00 \pm 0.05$

Подобные результаты получены в работе [4]: для  $D_2^-$ , были обнаружены три фракции с разными временами жизни, правда, эти времена намного больше, чем полученные в нашей работе. Для  $H_2^-$  и  $HD^-$  авторы [4] упоминают только по одной фракции. У нас же, кроме двух групп, присутствует долгоживущая компонента, о которой упоминалось в начале статьи, и время жизни которой измерить не удалось. Так что компонент (фракций) у нас тоже три.

Соответствуют ли две группы измерений двум состояниям ионов – такое предположение напра-

шивается, но никаких подтверждений ему нет. Чем соответствуют эти группы, осталось неясным.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беляев В.А., Козлов Д.А., Терентьев А.А., Тренин А.Е.* // Физика плазмы. 2017. Т. 43. С. 874.
2. *Беляев В.А., Дубровин М.М., Козлов Д.А., Терентьев А.А., Тренин А.Е., Шолин Г.В.* // Физика плазмы. 2010. Т. 36. С. 1024.
3. Computer code SIMION 3D Version 7.0 Sci. Instrum. Services, Ringoes, NJ 08551, USA.
4. *Heber O., Golser R., Gnaser H., Berkovits D., Toker Y., Eritt M., Rappaport M.L., Zajfman D.* // Phys. Rev. A. 2006. V. 73. P. 0605019(R).