

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**имени М.В.ЛОМОНОСОВА**

---

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ**  
**ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени Д.В.СКОБЕЛЬЦЫНА**

**Я.А. Теплова, Ю.А. Белкова**

**ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ИОНОВ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ**

**Препринт НИИЯФ МГУ №2010-1/858**

**Москва, 2010 г.**

УДК 539.186

Я.А. Теплова, Ю.А. Белкова

e-mail: [teplova@anna19.sinp.msu.ru](mailto:teplova@anna19.sinp.msu.ru)

## **ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ИОНОВ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ**

Препринт НИИЯФ МГУ №2010-1/858

### **Аннотация**

Собраны, систематизированы и проанализированы полученные в НИИЯФ МГУ экспериментальные данные по потерям энергии различных ионов в газовых средах. Рассмотрены общие закономерности потерь энергии ионов в зависимости от основных параметров взаимодействия.

Ya.A.Teplova, Yu.A.Belkova

## **ENERGY LOSS OF IONS IN GASEOUS MEDIA**

Preprint MSU SINP № № 2010-1/858

### **Abstract**

This work presents a compilation of experimental data on the energy loss obtained in Laboratory of Atomic Collisions of Scobeltsyn Nuclear Physics Research Institute for various ions in gaseous media. The data are summarized in tables and graphics with reference list attached. The dependence of energy loss on the main interaction parameters is analyzed.

© Я.А. Теплова, Ю.А. Белкова

© НИИЯФ МГУ, 2010

1. ВВЕДЕНИЕ.....	4
1.1 ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	5
1.2 ОСНОВНЫЕ МОДЕЛИ ТЕОРИИ ТОРМОЖЕНИЯ.....	6
<b>2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О ПОТЕРЯХ ЭНЕРГИИ.....</b>	<b>9</b>
2.1 ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ИОНОВ В ВОДОРОДЕ.....	10
2.2 ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ИОНОВ В ГЕЛИЕ.....	13
2.3 ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ИОНОВ В МЕТАНЕ .....	17
2.4 ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ИОНОВ В ВОЗДУХЕ .....	19
2.5 ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ИОНОВ В АРГОНЕ .....	26
2.6 ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ИОНОВ В БЕНЗОЛЕ .....	30
<b>3. АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ИОНОВ В РАЗЛИЧНЫХ ГАЗАХ .....</b>	<b>31</b>
3.1 НЕМОНОТОННОСТЬ ЗАВИСИМОСТИ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ОТ ЗАРЯДА ЯДРА НАЛЕТАЮЩЕГО ИОНА .....	32
3.2 СИММЕТРИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ОТНОСИТЕЛЬНО ЗАРЯДОВ ЯДРА НАЛЕТАЮЩЕГО ИОНА И АТОМА МИШЕНИ .....	33
3.3 НАРУШЕНИЕ ПРАВИЛА АДДИТИВНОСТИ ПРИ ПОТЕРЯХ ЭНЕРГИИ ИОНОВ В УГЛЕВОДОРОДНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ .....	35
<b>4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ .....</b>	<b>38</b>
<b>5. ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>39</b>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Торможение и перезарядка быстрых ионов при соударении их с атомами среды принадлежат к наиболее типичным явлениям, сопровождающим прохождение быстрых атомных частиц через вещество. Интерес к этим явлениям в области скоростей ионов  $v > v_0 = e^2/\hbar$  возникает главным образом в связи с расширением ядерных исследований с быстрыми тяжелыми ионами, проблемами получения их в ускорителях, а также в связи с некоторыми работами в области управляемого термоядерного синтеза.

Для ядерных исследований необходимы прежде всего сведения о величине средних потерь энергии и пробегах ионов различных элементов в разных средах. При рассмотрении торможения быстрых ионов с атомным номером  $Z > 2$  становится невозможным игнорировать процессы захвата и потери электронов этими ионами, поскольку при скорости ионов  $v \sim Zv_0$ , ниже которой указанные процессы происходят с большой вероятностью, энергия частиц оказывается довольно большой: если протоны и  $\alpha$ -частицы при  $v = Zv_0$  обладают энергией 25 и 400 кэВ, то ионы азота  $^{14}\text{N}_7$  – 17 МэВ, а ионы  $^{20}\text{Ne}_{10}$  – 25 МэВ. В результате захвата и потери электронов средний заряд ионов становится меньше заряда их ядер  $Z$ , вследствие чего уменьшаются и средние потери энергии. С другой стороны, те же процессы сами по себе являются дополнительными источниками потерь энергии. Поэтому для понимания особенностей торможения быстрых многозарядных частиц необходимо изучение процессов перезарядки. Исследование эффективных сечений перезарядки ионов и равновесного распределения зарядов, устанавливающегося в пучке быстрых частиц в результате многократного изменения ими своего заряда, представляет, кроме того, и большой самостоятельный интерес, например, в связи с задачами получения интенсивных пучков быстрых многозарядных ионов в ускорителях.

Таким образом, для решения научных и практических задач необходимо прежде всего знать величины средних потерь энергии и пробегах ионов в веществе, равновесный зарядовый состав пучка, эффективные сечения потери и захвата электронов.

Известно, что физические проблемы, связанные с прохождением быстрых ионов через вещество были впервые исследованы в рамках классической теории Н.Бором (1913 г.) [1], а затем в квантово-механическом приближении - Х.Бете (1930 г.) [2] и квази-классическом – Ф.Блохом (1933 г.) [3]. На протяжении последних лет множество исследователей выступало с публикациями результатов оригинальных измерений и расчетов, а также с подробными обзорами этих материалов за определенный период времени. Среди авторов крупные физики (кроме упомянутых): Э. Ферми [4], А.Фано [5], С.Аллисон [6],

Д.Нортклифф [7], Й.Линдхард [8] и многие другие. Удачную модель торможения в области малых энергий предложил О.Б.Фирсов [9]. Многотомный обзор (1976-85 гг.) с графическими иллюстрациями принадлежит А.Зиглеру с соавторами [10]. Основные достижения в данной области за последние годы рассматривались в статьях и монографиях П.Зигмунда [11]. Большой экспериментальный материал представлен Х.Паулом на сайте [12], однако получение новых данных относительно потерь энергии конкретных тяжелых ионов актуально. В данной работе представлены экспериментальные данные о потерях энергии различных ионов от водорода до криптона в газовых средах.

## 1.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Основными характеристиками торможения быстрых заряженных частиц при прохождении их через вещество являются удельные потери энергии  $S = - (dE/dx)$  и пробеги частиц  $R$ . Величина  $S$ , которую часто называют тормозной способностью вещества, определяется как средняя энергия, теряемая частицей на единице длины ее пути:

$$S = N \int T d\sigma(T), \quad (1)$$

где  $N$  – количество атомов в  $\text{см}^3$  вещества,  $d\sigma(T)$  – дифференциальное сечение потери энергии в индивидуальном ион-атомном взаимодействии.

Полным пробегом

$$R = \int_0^E S^{-1} dE \quad (2)$$

называют длину пути частицы в веществе до полной остановки. Несмотря на непосредственную связь этих величин, они имеют вполне самостоятельное значение и могут быть измерены независимо. Процесс торможения частиц является статистическим, поэтому практически важным становится оценка разброса величин  $S$  и  $R$  около среднего значения  $\Delta \bar{S}^2, \Delta \bar{R}^2$ . Испытывая ряд столкновений с атомами среды, частицы изменяют энергию и направление движения, отклоняясь от своего первоначально пути. Это явление характеризуется углами однократного и многократного рассеяния  $\theta, \Omega$ , величины которых сказываются на траектории, интенсивности направленного пучка и на других параметрах ядерно-физических процессов.

Изменение зарядового состава ионного пучка при прохождении его через вещество описывается системой дифференциальных уравнений

$$\frac{dF_i}{dt} = \sum_k F_k \sigma_{ki} - F_i \sum_k \sigma_{ik}, \quad \sum_i F_i = 1, \quad (3)$$

где заряд иона  $i$  может принимать значения от 1 до  $Z$ . Величина  $F_i$  - относительное количество ионов с зарядом  $i$  в ионном пучке меняется в соответствии с изменением толщины мишени  $t$ . Решая систему уравнений (3), по известным значениям сечений потери и захвата электрона  $\sigma_{ik}$ , можно определить величины  $F_i$ , а, следовательно, и средний заряд ионов  $\bar{i} = \sum_i iF_i$ .

## 1.2 ОСНОВНЫЕ МОДЕЛИ ТЕОРИИ ТОРМОЖЕНИЯ.

На основе экспериментальных исследований установлена общая картина поведения величины потерь энергии в зависимости от скорости (энергии) частиц. Можно условно выделить четыре энергетические области, различающиеся величиной и динамикой изменения  $S$ , а также, очевидно, основными механизмами взаимодействия, приводящими к энергетическим потерям.

- I-** область малой скорости  $v$  (энергии  $E$ ),  $v < v_0 Z^{2/3}$ . В этой области значительная доля потерь энергии частиц приходится на столкновения с атомами  $S_n$  (упругие) и с электронами атомов  $S_e$  (неупругие). Все аналитические выражения, описывающие процесс торможения в этой области за счет столкновения частиц с электронами, указывают на линейную зависимость  $R$  и  $S$  от  $v$ . Потери энергии при столкновениях частиц с атомами описываются классически и в среднем не зависят от их скорости.
- II-** область максимума потерь энергии, скорость частиц близка к скорости орбитальных электронов атомов, с которыми происходит столкновение. Велика вероятность потери и захвата электронов ионами, что приводит к изменению ионного заряда. Расчеты потерь энергии затруднены из-за необходимости учета целого ряда процессов и осуществляются главным образом полуэмпирическими методами с экспериментальными поправками и уточнениями.
- III-** область больших скоростей,  $v > v_0 Z^{2/3}$ ,  $S_e \sim 1/v^2$ , преобладает механизм потери энергии за счет неупругого взаимодействия с электронами атомов мишени. С достаточной степенью точности величина  $S_e$  описывается в первом Борновском приближении моделью бинарных столкновений с учетом связи электронов в атоме, что существенно для тяжелых веществ. В этой области доля потерь энергии за счет радиационного излучения невелика.
- IV-** релятивистская область, справедливо квантово - механическое описание. Торможение связано с потерей энергии при столкновении с электронами атомов или свободными электронами, а также другими эффектами.

Удовлетворительное моделирование процесса осуществляется в рамках первого Борновского приближения [13] с релятивистскими поправками.

Для описания процесса в I области скоростей,  $v \ll v_0$ , следует напомнить приближенную формулу, полученную Ферми и Теллером [4], из которой следовало, что потери энергии заряженных частиц пропорциональны их скорости. (в формулу добавлен заряд иона  $i$ ), а именно:

$$S_e = 502vi^2 \ln Z_c^{2/3} \text{ МэВ/см} \quad (4)$$

Наиболее широко используемым оказалось полуклассическое выражение, полученное Фирсовым [8], в котором для определения  $S_e$  средняя энергия возбуждения электронов при столкновении проинтегрирована по всем параметрам столкновения тяжелых частиц:

$$S_e = 2.34 \cdot 10^{-15} (Z + Z_c)v, \text{ [эВ} \cdot \text{см}^2/\text{атом]}, \quad 1/4 \leq Z/Z_c \leq 4. \quad (5)$$

Выражение для  $S_e$ , полученное Линдхардом и др. [9], записывается следующим образом:

$$S_e = N\xi 8\pi d_0 e^2 \left[ \frac{ZZ_c}{(Z^{2/3} + Z_c^{2/3})^{3/2}} \right] \frac{v}{v_0}, \quad (6)$$

где  $N$ - количество атомов в  $\text{см}^3$  вещества,  $\xi \approx Z^{1/6}$ ,  $d_0 = 5.28 \cdot 10^{-12} \text{ см}$ .

Приведенные выражения дают правильную линейную зависимость  $S_e$  от скорости частиц  $v$ . Пределы применимости полученной линейной зависимости по энергии довольно подробно обсуждаются в [14]. Необходимо отметить, что из-за описания атома в рамках модели Томаса-Ферми, эффекты, связанные с оболочечной структурой последнего, например, экспериментально обнаруженные осцилляции  $S_e(Z, Z_c)$ , формулами не воспроизводятся. Для описания подобных осцилляций ряд авторов в теоретических работах [15,16] модифицировали формулы Фирсова и Линдхарда и др., используя для описания атома вместо модели Томаса-Ферми более сложную модель Хартри-Фока и сделав некоторые другие поправки..

В области малых скоростей существенную роль в потерях энергии играют упругие столкновения иона с атомом. Расчет этого процесса и соответствующие аналитические выражения были опубликованы в работах Бора [17], Линдхарда и Шарффа [9], например

$$S_n = \frac{\pi^2}{2.7183} \frac{M}{M + M_c} \cdot \frac{ZZ_c e^2 a_0}{(Z^{2/3} + Z_c^{2/3})^{1/2}}, \quad (6)$$

где  $M, Z$  – масса и ядерный заряд иона, а  $M_c, Z_c$  – те же характеристики среды.

С увеличением скорости частицы неупругие потери энергии растут, а упругие – убывают, поэтому в области больших энергий( скоростей) торможение определяется главным образом неупругими потерями.

Во II области скоростей моделирование торможения ионов существенно усложняется, т.к. заряд ионов изменяется вдоль траектории частиц в веществе в процессе столкновения с атомами мишени за счет потери и захвата электрона. Оба процесса носят статистический характер и определяются сечениями потери  $\sigma_{i,i+1}$  и захвата  $\sigma_{i,i-1}$  электрона (кратными процессами во многих случаях можно пренебречь), которые зависят от скорости и заряда ионов, а также от атомного номера мишени, причем в общем случае эта зависимость немонотонна. Средний эффективный заряд иона может быть рассчитан как средний  $\bar{i} = \sum_{i=0}^Z iF_i$ , если известны (из экспериментальных данных или из расчетов) величины зарядовых фракции  $F_i$ . Были также предложены различные зависимости среднего заряда от скорости иона, начиная с варианта предложенного Н.Бором [17]  $\bar{i} = Z^{1/3} \frac{v}{v_0}$ .

Дмитриевым и Николаевым [18], для области  $\frac{\bar{i}}{Z} < 0.6$ , было получено выражение  $\frac{\bar{i}}{Z} = \frac{kv}{Z^{1/2}v_0}$ , где коэффициент  $k$  принимает значения от 0.4 для ионов в аргоне до 0.35 в гелии. В настоящее время существуют и другие полуэмпирические приближения. Например, для описания среднего заряда ионов в пленках углерода используют выражения:

$$\frac{\bar{i}}{Z} = (1 + X^{-5/3})^{-3/5}, \quad 0.3 < \frac{\bar{i}}{Z} < 0.7, \quad [19]$$

$$\frac{\bar{i}}{Z} = 1 - \exp(-X), \quad [20]$$

$$\frac{\bar{i}}{Z} = 1 - \exp(-1.25 + 0.32X - 0.11X^2), \quad [21]$$

где  $X = v/(v'Z^{0.45})$ ,  $v' = 3.6 \times 10^8 \text{ см/с}$ .

Изменение заряда ионов за счет процессов захвата и потери электронов приводит к тому, что следует учитывать потери энергии иона, вызванные непосредственно перезарядкой [22]:

$$(-dE/dx)_n = N_c \sum F_i \sigma_{i,i\pm 1} (J + E_k), \quad (7)$$

где  $N_c$ - количество атомов в  $1 \text{ см}^3$  вещества,  $F_i$ - зарядовая фракция ионов,  $\sigma_{i,i\pm 1}$ - сечения потери или захвата электрона ионом с зарядом  $i$ ,  $J$ - энергия связи электрона в атоме среды для процесса захвата электрона или энергия связи электрона в налетающем ионе для процесса потери электрона,  $E_k$ - кинетическая энергия электрона, участвующего в процессе перезарядки.



Наиболее полно описано торможение ионов в **III** области скоростей, где преобладают потери энергии за счет неупругого взаимодействия ионов с электронами мишени. Согласно формуле Бете-Блоха [ 2,3 ]

$$(-dE/dx)_{эл} = (4\pi e^4/mv^2) Z^2 Z_c N_c [ \ln( 2mv^2/ I(1-\beta^2) ) - C_{K,L} - \delta -\beta^2 ] , \quad (8)$$

где  $e$  и  $m$  – заряд и масса электрона,  $Z_c$  – ядерный заряд атома среды,  $I$  – потенциал его ионизации. При  $v > v_0 Z^{2/3}$  принято считать  $I = Z_c \cdot I_0$ , где  $I_0 = 13.6$  эВ. В настоящее время считается установленным, что  $I$  является функцией скорости и осциллирует с изменением  $v$  и  $Z_c$ . Оболочечная поправка  $C_{K,L}$  учитывает неполное участие К и L-электронов мишени в торможении,  $C_{K,L}$  достигает максимальной величины от 0.1 до 0.3 для легких и тяжелых ионов соответственно;  $\delta$  - характеристика поляризации среды,  $\beta = v/c$  – релятивистская поправка.

Формула Бете-Блоха удовлетворительно описывает торможение протонов в водороде и других легких средах, начиная с энергии частиц около 1 МэВ. Применимость такого расчета для тяжелых ионов оправдана, если ион, пройдя тонкий слой вещества, полностью теряет электроны. Возможные варианты изменений формулы (8) подробно обсуждаются, например, в [ 11].

В области средних энергий налетающие ионы не полностью ионизируются, поэтому для расчетов потерь энергии целесообразно использовать формулу Блоха [23] модифицированную для многозарядных ионов [24]:

$$(-dE/dx)_{эл} = (4\pi e^4/mv^2) i_{eff}^2 Z_c N_c [ \ln( 2mv^2/ I ) - Q ] , \quad (9)$$

где  $Q = \text{Re } \psi [1 + i(i_{eff}e^2/\hbar v)] - \psi(1)$ ,  $\psi$ - логарифмическая производная  $\Gamma$ -функции,  $i = \sqrt{-1}$ . Необходимо отметить, что в выражении (2) для многоэлектронных ионов ядерный заряд заменен на эффективный заряд  $i_{eff}$ , рассчитанный с учетом различных зарядовых состояний ионов,  $i_{eff}^2 = \sum i^2 \cdot F_i$ , и изменяющийся по мере прохождения иона через мишень. При расчете потерь энергии ионов в сложных средах, например углеводородах, используются усредненные значения заряда ядра  $Z_c$  и потенциала ионизации среды  $I$ :  $NZ_c = \sum (N_k Z_k)$ ,  $N \ln I = \sum (N_k \ln I_k)$ , где  $N_k$ - число атомов отдельных элементов в молекуле.

Более подробное обсуждение относительного вклада различных процессов в потери энергии и применимости приведенных аналитических выражений для расчетов потерь энергии приведено в [24].

## **2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О ПОТЕРЯХ ЭНЕРГИИ**

В настоящей работе приведены результаты, полученные в ЛАС НИИЯФ МГУ на основе экспериментального изучения процессов прохождения быстрых ионов через газовые среды.

Для измерения удельной ионизации выведенный из 72-см циклотрона и сфокусированный пучок ионов попадал в камеру торможения. Перемещая счетчик вдоль пробега частицы, можно было определять величины амплитуд импульсов по ходу пучка, и таким образом, устанавливать зависимость удельной ионизации от пробега ионов. Полученные кривые нормировались по начальной энергии частиц в предположении о пропорциональности ионизации и потери энергии. Для контроля проводилось сравнение амплитуды импульсов измеряемой частицы с импульсом частицы известной энергии. Точность измерения ( $-dE/dx$ ) составляла около 10-15%.

## ОБЪЯСНЕНИЕ ТАБЛИЦ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И КОММЕНТАРИИ

Таблицы экспериментальных данных представлены в следующем порядке:

- потери энергии ионов в **конкретной газовой среде**;
- потери энергии **конкретного иона** в **данной газовой среде**;
- рисунки, иллюстрирующие потери энергии ионов в **данной газовой среде**.

В каждой таблице указывается:

E – кинетическая энергия налетающего иона в единицах МэВ/нуклон, которая связана со скоростью соотношением.

$$V = V_0 \sqrt{E[\text{МэВ} / \text{нуклон}] * 40}, \text{ где } V_0 = 2.188 \cdot 10^8 \text{ см/сек};$$

V - скорость налетающего иона в единицах  $10^8$  см/сек;

$-dE/dx$  – значения потери энергии ионов, выраженные в единицах (**кэВ см<sup>2</sup> /мкг**) и ( **$10^{-15}$  эВ см<sup>2</sup>/ атом**). Коэффициенты перевода значений потерь энергии в рассмотренных газовых средах приведены ниже:

$$A \times (10^{-15} \text{ эВ см}^2 / \text{ атом}) = (\text{кэВ см}^2 / \text{мкг})$$

среда	H <sub>2</sub>	He	CH <sub>4</sub>	воздух	Ar	бензол
A	0,598	0,150	0,0376	0,0416	0.0151	0.0078

На рисунках показаны экспериментальные данные других авторов, ссылки на которые приводятся в подписях к рисункам.

## 2.1 ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ИОНОВ В ВОДОРОДЕ

### 2.1.1 Ионы водорода в водороде

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0,05	3,11	3,77	6.3
0,75	3,8	3,77	6.3
0,1	4,39	3,53	5.9
0,15	5,38	2,69	4.5
0,2	6,21	2,39	4.0
0,25	6,93	2,03	3.4
0,4	8,76	1,435	2.4
0,6	10,74	1,016	1.7
0,7	11,63	0,897	1.5
1,0	13,89	0,717	1.2
1,5	17,0	0,4785	0.8
2,0	19,62	0,389	0.65

### 2.1.2 Ионы гелия в водороде

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0.025	2.19	5,14	8.6
0.038	2.69	5,62	9.4
0.05	3.11	6,10	10.2
0.063	3.47	6,59	11.0
0.075	3.8	6,825	11.4
0.088	4.12	7,12	11.9
0.1	4.39	7,36	12.3

### 2.1.3 Ионы лития в водороде

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0.015	1.685	3,64	6.09
0.021	2.03	4,58	7.66
0.029	2.35	5,58	9.33
0.036	2.625	6,58	11.0
0.043	2.87	7,64	12.8
0.05	3.1	8,7	14.55
0.052	3.15	8,87	14.8
0.056	3.28	9,29	15.4
0.057	3.32	9,4	15.7
0.061	3.43	9,7	16.2
0.064	3.52	9,93	15.55
0.069	3.65	10,11	16.9
0.073	3.75	10,58	17.7
0.135	5.1	13,16	22.0
0.16	5.5	13,56	22.7
0.22	6.5	13,69	22.9

0.255	7.0	13,4	22.4
0.285	7.4	12,93	21.6
0.31	7.7	12,22	20.4
0,32	7,8	12,0	20.0
0.33	7.98	11,54	19.3
0.35	8.2	11,29	18.9
0.36	8.35	10,93	18.3
0.39	8.68	10,23	17.1
0.47	9.5	8,58	14.3
0.52	10	8,11	13.6
0.695	11,54	7,81	13.1

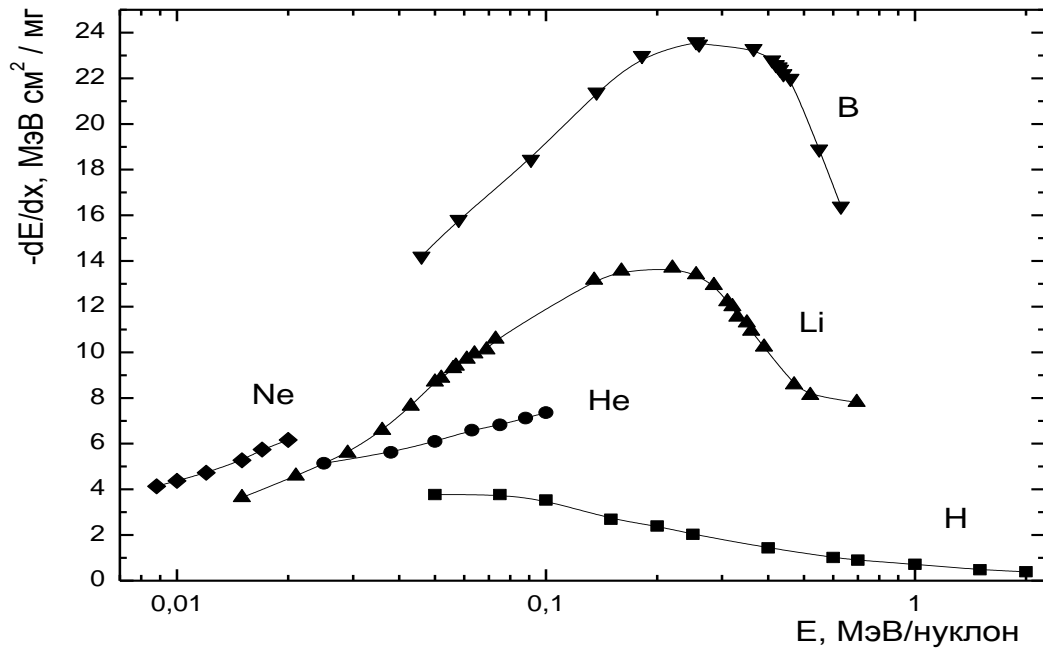
### 2.1.3 Ионы БОРА В ВОДОРОДЕ

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0.046	2,96	14,21	23.8
0.058	3,33	15,82	26.45
0.091	4,18	18,45	30.85
0.137	5,12	21,4	35.8
0.182	5,91	23	38.5
0.255	6,99	23,6	39.5
0.26	7,07	23,5	39.3
0.365	8,36	23,3	39.0
0.41	8,84	22,8	38.1
0.42	8,98	22,6	37.8
0.427	9,05	22,5	37.6
0.431	9,09	22,4	37.45
0.44	9,18	22,2	37.1
0.46	9,37	22	36.8
0.55	10,25	18,9	31.6
0.63	10,97	16,4	27.4

### 2.1.4 Ионы НЕОНА В ВОДОРОДЕ

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0.0088	1,3	4,13	6.91
0.01	1,39	4,37	7.31
0.012	1,55	4,73	7.91
0.015	1,70	5,27	8.81
0.017	1,83	5,74	9.6
0.02	1,97	6,16	10.3

### 2.1.5 ИЛЛЮСТРАЦИИ: ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ (-dE/dx) РАЗЛИЧНЫХ ИОНОВ (УКАЗАНЫ НА РИСУНКЕ) В ВОДОРОДЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭНЕРГИИ ИОНОВ



## 2.2 ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ИОНОВ В ГЕЛИЕ

### 2.2.1 Ионы ВОДОРОДА В ГЕЛИЕ

E , МэВ/нуклон	V , $10^8$ см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, $-dE/dx$	
		кэВ $\text{cm}^2 / \text{мкг}$	$10^{-15}$ эВ $\text{cm}^2 / \text{атом}$
0.05	3.11	1.05	7
0.1	4.39	1.08	7.2
0.15	5.38	0.93	6.2
0.2	6.21	0.84	5.6
0.25	6.93	0.75	5
0.4	8.76	0.55	3.67
0.6	10.74	0.42	2.8
0.7	11.63	0.307	2.05
1	13.89	0.285	1.9
1.5	17.0	0.22	1.47
2	19.62	0.165	1.1

--	--	--	--

### 2.2.2 Ионы гелия в гелие

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0.025	2.19	1.25	8.33
0.038	2.69	1.47	9.8
0.05	3.11	1.68	11.2
0.063	3.47	1.96	13.07
0.075	3.8	2.12	14.13
0.088	4.12	2.3	15.3
0.1	4.39	2.48	16.53

### 2.2.3 Ионы лития в гелие

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом

0.015	1.685	1.0	6.67
0.021	2.03	1.118	7.453
0.029	2.35	1.295	8.63
0.036	2.625	1.472	9.183
0.043	2.87	1.63	10.867
0.05	3.1	1.766	11.773
0.052	3.15	1.825	12.167
0.056	3.28	1.885	12.567
0.057	3.32	1.945	12.93
0.061	3.43	2.0	13.33
0.064	3.52	2.12	14.13
0.065	3.55	2.15	14.33
0.069	3.65	2.27	15.13
0.073	3.75	2.35	15.67
0.135	5.1	3.65	24.33
0.16	5.5	4.06	27.067
0.22	6.5	4.945	32.967
0.255	7.0	5.24	34.93
0.285	7.4	5.42	36.13
0.31	7.7	5.47	36.467
0.33	7.98	5.5	36.67
0.35	8.2	5.48	36.53
0.36	8.32	5.47	36.47
0.37	8.46	5.45	36.33
0.39	8.68	5.42	36.13
0.47	9.5	5.08	33.867
0.52	10	4.75	31.67

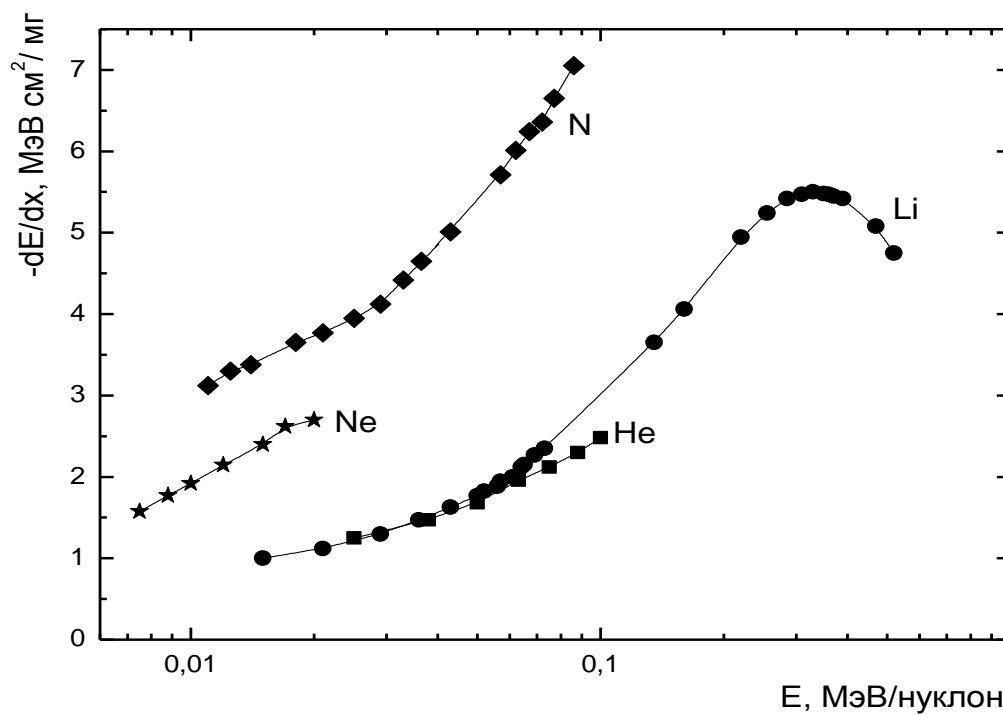
#### 2.2.4 Ионы АЗОТА В ГЕЛИЕ

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0.011	1.439	3.12	20.8
0.0125	1.552	3.3	22
0.014	1.66	3.38	22.53
0.018	1.857	3.65	24.33
0.021	2.03	3.77	25.13
0.025	2.19	3.95	26.33
0.029	2.35	4.12	27.467
0.033	2.51	4.42	29.467
0.043	2.87	5.01	33.4
0.0365	2.65	4.65	31
0.057	3.31	5.71	38.067
0.062	3.45	6.01	40.067
0.067	3.60	6.24	41.6
0.072	3.71	6.36	42.4
0.077	3.85	6.65	44.33
0.086	4.06	7.05	47

### 2.2.5 Ионы НЕОНА В ГЕЛИЕ

E , МэВ/нуклон	V , $10^8$ см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	$10^{-15}$ эВ см <sup>2</sup> / атом
0.0075	1.2	1.575	10.5
0.0088	1.3	1.77	11.8
0.01	1.39	1.92	12.8
0.012	1.55	2.145	14.3
0.015	1.70	2.4	16
0.017	1.83	2.62	17.47
0.02	1.97	2.7	18

### 2.2.6 ИЛЛЮСТРАЦИИ: ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ (-dE/dx) РАЗЛИЧНЫХ ИОНОВ (УКАЗАНЫ НА РИСУНКЕ) В ГЕЛИЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭНЕРГИИ ИОНОВ





## 2.3 ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ИОНОВ В МЕТАНЕ

### 2.3.1 Ионы ВОДОРОДА В МЕТАНЕ

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0.05	3.11	1,535	40.82
0.075	3.8	1,54	40.96
0.1	4.39	1,46	38.83
0.15	5.38	1,26	33.51
0.2	6.21	1,072	28.51
0.25	6.93	0,931	24.76
0.4	8.76	0,68	18.085
0.6	10.74	0,512	13.62

### 2.3.2 Ионы ЛИТИЯ В МЕТАНЕ

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0.015	1.685	1,816	48.3
0.021	2.03	2,26	60.1
0.029	2.35	2,78	73.9
0.036	2.625	3,22	85.6
0.043	2.87	3,62	96.3
0.05	3.1	3,97	105.6
0.052	3.15	4,07	108.2
0.056	3.28	4,26	113.3
0.057	3.32	4,33	115.2
0.061	3.43	4,5	119.7
0.064	3.52	4,67	124.2
0.065	3.55	4,69	124.7
0.069	3.65	4,85	129
0.073	3.75	4,98	132.45
0.135	5.1	6,08	161.7
0.16	5.5	6,14	163.3
0.22	6.5	6,11	162.5
0.255	7.0	6,05	160.9
0.285	7.4	5,98	159
0.31	7.7	5,92	157.45
0.32	7.8	5,9	156.9
0.33	7.98	5,86	155.85
0.35	8.2	5,83	155.05
0.36	8.32	5,82	155.2
0.36	8.35	5,8	154.25
0.37	8.46	5,79	154
0.39	8.68	5,74	153.1
0.47	9.5	5,62	149.5
0.52	10	5,54	147.3

### 2.3.3 ИОНЫ БОРА В МЕТАНЕ

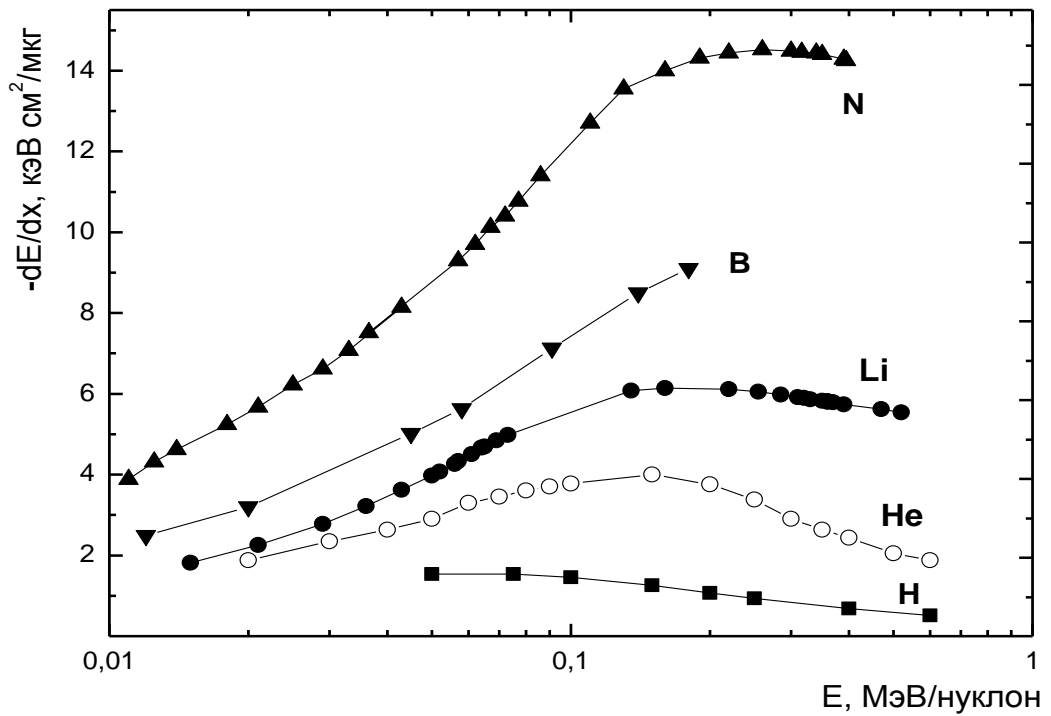
E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0.012	1.5	2.49	58.2
0.021	2.03	3.05	81.1
0.045	2.96	5.02	133.5
0.058	3.33	5.63	149.7
0.091	4.18	7.13	189.6
0.14	5.12	8.5	226.1
0.18	5.91	9.1	242.0

### 2.3.4 ИОНЫ АЗОТА В МЕТАНЕ

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0.011	1.439	3,88	103.2
0.0125	1.552	4,32	114.9
0.014	1.66	4,62	122.9
0.018	1.857	5,24	139.4
0.021	2.03	5,67	150.8
0.025	2.19	6,22	165.4
0.029	2.35	6,62	176.1
0.033	2.51	7,08	188.3
0.043	2.87	8,15	216.75
0.0365	2.65	7,52	200
0.057	3.31	9,3	247.3
0.062	3.45	9,7	258
0.067	3.60	10,12	269.15
0.072	3.71	10,4	276.6
0.077	3.85	10,77	286.4
0.086	4.06	11,4	303.2
0.11	4.54	12,7	337.8
0.13	4.98	13,55	359
0.16	5.5	14,0	372.3
0.19	6.0	14,31	380.6
0.22	6.5	14,44	384
0.26	7.0	14,52	386.2
0.3	7.63	14,48	358.1
0.316	7.79	14,46	384.6
0.34	8.06	14,44	384
0.35	8.18	14,4	383
0.39	8.62	14,29	380
0.395	8.71	14,25	379

### 2.3.5 ИЛЛЮСТРАЦИИ: ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ( $-dE/dx$ ) РАЗЛИЧНЫХ ИОНОВ (УКАЗАНЫ НА РИСУНКЕ) В МЕТАНЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭНЕРГИИ ИОНОВ.

Сплошные символы – результаты данной работы, О – получены из материалов работы [12].



## 2.4 ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ИОНОВ В ВОЗДУХЕ

### 2.4.1 Ионы водорода в воздухе

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, $-dE/dx$	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0.025	2.19	0.582	14.0
0.05	3.11	0.61	14.7
0.075	3.8	0.62	14.9
0.1	4.39	0.623	15.0
0.15	5.38	0.61	14.7
0.2	6.21	0.582	14.0
0.25	6.93	0.555	13.3
0.4	8.76	0.45	10.8
0.6	10.74	0.335	8.05
0.7	11.63	0.3	7.2
0.75	12.04	0.285	6.85
1	13.89	0.238	5.7
1.4	16.41	0.188	4.5
1.5	17.0	0.18	4.3
2	19.62	0.144	3.5

**2.4.2 Ионы гелия в воздухе**

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0.0125	1.55	0.41	9.9
0.025	2.19	0.72	17.3
0.038	2.69	1.0	24.0
0.05	3.11	1.1	26.4
0.063	3.47	1.25	30.0
0.075	3.8	1.39	33.4
0.088	4.12	1.525	36.6
0.1	4.39	1.615	38.8
0.14	5.22	1.89	45.4
0.15	5.38	1.844	44.3
0.157	5.49	1.955	47.0
0.16	5.57	1.95	46.9
0.18	5.94	2.01	48.3
0.19	6.02	2.015	48.4
0.25	6.95	2.02	48.55
0.31	7.77	1.958	47.1
0.375	8.5	1.885	45.3
0.44	9.2	1.786	43.0
0.5	9.82	1.696	40.8
0.625	10.97	1.5	36.05
0.7	11.58	1.412	33.9
0.72	11.75	1.386	33.3
0.724	11.80	1.372	33.0
0.74	11.91	1.347	32.4
0.75	12.04	1.358	32.6
0.88	13.0	1.159	27.9
1	13.9	1.028	24.7
1.25	15.54	0.783	18.8
1.46	16.75	0.6025	14.5
1.47	16.83	0.588	14.1
1.51	17.03	0.571	13.7

**2.4.3 Ионы лития в воздухе**

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0.015	1.685	1.076	25.9
0.021	2.03	1.296	31.2
0.029	2.35	1.411	33.9
0.036	2.625	1.689	40.6
0.043	2.87	1.852	44.5
0.05	3.1	2.01	48.3
0.052	3.15	2.04	49.0
0.056	3.28	2.13	51.2

0.057	3.32	2.145	51.6
0.061	3.43	2.23	53.6
0.064	3.52	2.29	55.05
0.065	3.55	2.31	55.5
0.135	5.1	3.27	78.6
0.16	5.5	3.41	82.0
0.22	6.5	3.61	86.8
0.255	7.0	3.64	87.5
0.285	7.4	3.61	86.8
0.31	7.7	3.58	86.1
0.33	7.98	3.53	84.9
0.34	8.2	3.49	83.9
0.47	9.5	3.16	76.0
0.52	10	3.02	72.6

#### 2.4.4 Ионы БОРА В ВОЗДУХЕ

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0.012	1.5	1.755	42.2
0.045	2.96	3.14	75.5
0.058	3.33	3.42	82.2
0.091	4.18	4.12	99.0
0.14	5.12	4.76	114.4
0.18	5.91	5.1	122.6
0.25	6.99	5.41	130.05
0.26	7.07	5.42	130.3
0.27	7.18	5.44	130.8
0.27	7.24	5.45	131.0
0.28	7.38	5.46	131.25
0.36	8.36	5.5	132.2

#### 2.4.5 Ионы УГЛЕРОДА В ВОЗДУХЕ

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0.0052	1	1.79	43.0
0.021	2	2.74	65.9
0.0385	2.72	3.345	80.4
0.077	3.85	4.57	109.9
0.12	4.72	5.75	138.2
0.13	5	6.21	149.3

**2.4.6 ИОНЫ АЗОТА В ВОЗДУХЕ**

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0.011	1.439	2.2	52.9
0.0125	1.552	2.41	57.9
0.014	1.66	2.55	61.3
0.018	1.857	2.8	67.3
0.021	2.03	2.99	71.9
0.025	2.19	3.23	77.6
0.029	2.35	3.43	82.45
0.033	2.51	3.64	87.5
0.043	2.87	4.15	99.8
0.0365	2.65	3.83	92.1
0.057	3.31	4.76	114.4
0.062	3.45	4.95	119.0
0.067	3.60	5.16	124.0
0.072	3.71	5.28	127.0
0.077	3.85	5.45	131.0
0.086	4.06	5.71	137.3
0.11	4.54	6.36	152.9
0.13	4.98	6.83	164.2
0.16	5.5	7.33	176.2
0.19	6.0	7.71	185.3
0.22	6.5	7.97	191.6
0.26	7.0	8.15	195.9
0.3	7.63	8.34	200.5
0.31	7.67	8.36	201.0
0.34	8.06	8.38	201.4
0.35	8.18	8.4	203.1
0.39	8.62	8.45	203.4
0.4	8.8	8.46	203.4
0.42	9.0	8.44	202.9
0.43	9.1	8.39	201.7

**2.4.7 ИОНЫ НЕОНА В ВОЗДУХЕ**

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом

0.01	1.39	1.705	41.0
0.012	1.55	1.913	46.0
0.015	1.70	2.1	50.5
0.017	1.83	2.265	54.45
0.02	1.97	2.41	57.9
0.044	2.92	5.28	126.9
0.049	3.06	5.47	131.5
0.051	3.13	5.59	134.4
0.074	3.77	6.15	147.8
0.078	3.87	6.88	165.4
0.084	4.03	7.12	171.2
0.093	4.23	7.28	175
0.098	4.34	7.42	178.4
0.1	4.4	7.45	179.1
0.1	4.44	7.52	180.8
0.13	5.07	8.22	197.6
0.14	5.18	8.28	199.0
0.15	5.34	8.40	201.9
0.16	5.49	8.56	205.8

#### 2.4.8 Ионы магния в воздухе

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0.0013	0.5	0.55	13.2
0.0052	1	0.94	22.6
0.012	1.5	1.26	30.3
0.025	2.2	1.57	37.7

#### 2.4.9 Ионы алюминия в воздухе

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0.0013	0.5	1.22	29.3
0.0052	1	1.96	47.1
0.012	1.5	2.53	60.8
0.021	2	3.02	72.6
0.0245	2.17	3.14	75.5
0.025	2.22	3.18	76.4
0.0325	2.5	3.47	83.4

**2.4.10 Ионы НАТРИЯ В ВОЗДУХЕ**

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0.00011	0.15	0.298	7.16
0.00047	0.3	0.502	12.1
0.0013	0.5	0.632	15.2
0.0033	0.8	0.982	23.6
0.0052	1	1.14	27.4
0.0081	1.25	1.33	31.2
0.011	1.5	1.52	36.5
0.017	1.8	1.57	37.7

**2.4.11 Ионы ФОСФОРА В ВОЗДУХЕ**

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0.0052	1	2.36	56.7
0.021	2	4.53	108.9
0.047	3	6	144.2
0.053	3.2	6.22	149.5

**2.4.12 Ионы АРГОНА В ВОЗДУХЕ**

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0.0013	0.5	1.26	30.3
0.0052	1	2.65	63.7
0.012	1.5	4	96.2
0.021	2	5.38	129.3
0.0325	2.5	6.85	164.7
0.025	2.2	6	144.2
0.032	2.47	6.8	163.5
0.034	2.55	6.97	167.5
0.0365	2.65	7.25	174.3
0.041	2.81	7.4	177.9
0.042	2.85	7.87	189.2
0.065	3.53	9.62	231.25

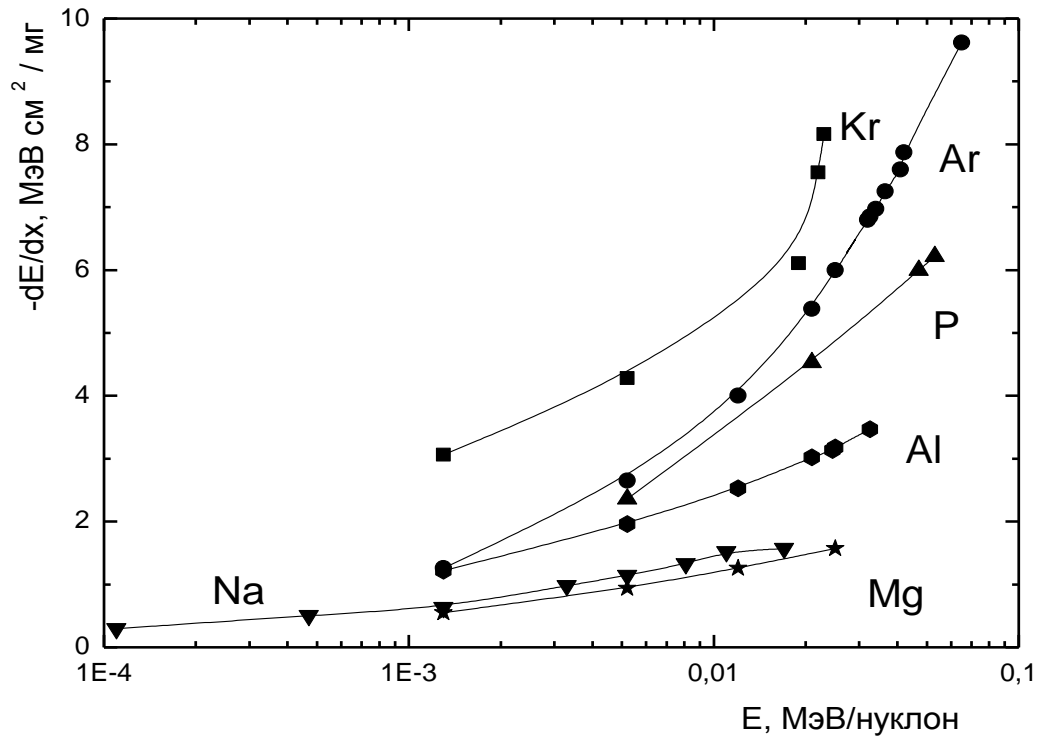
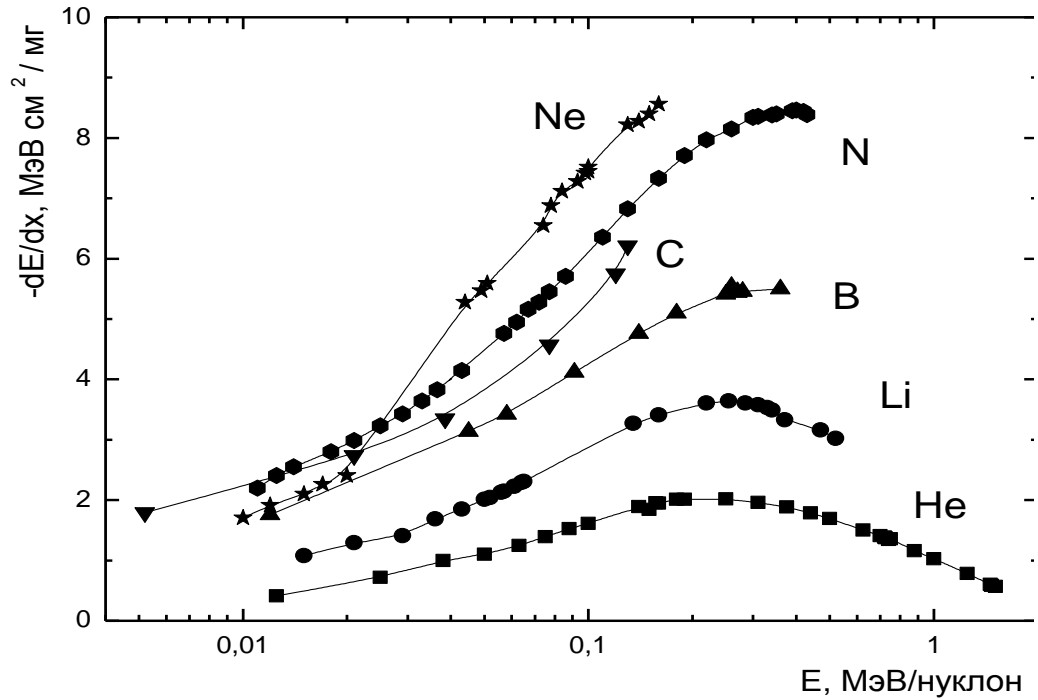
**2.4.13 Ионы КРИПТОНА В ВОЗДУХЕ**

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом



0.0013	0.5	3.06	73.6
0.0052	1	4.28	102.9
0.019	1.89	6.11	146.9
0.022	2.04	7.55	181.5
0.023	2.11	8.16	196.15

**2.4.14 ИЛЛЮСТРАЦИИ: ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ( $-dE/dx$ ) РАЗЛИЧНЫХ ИОНОВ (УКАЗАНЫ НА РИСУНКЕ) В ВОЗДУХЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭНЕРГИИ ИОНОВ**



## 2.5 ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ИОНОВ В АРГОНЕ

### 2.5.1 Ионы ВОДОРОДА В АРГОНЕ

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0.05	3.11	0.498	33.0
0.075	3.8	0.513	34.0
0.1	4.39	0.483	32.0
0.15	5.38	0.422	27.95
0.2	6.21	0.370	24.5
0.25	6.93	0.317	21.0
0.4	8.76	0.241	16.0
0.6	10.74	0.196	13.0
0.7	11.63	0.188	12.45
1	13.89	0.151	10
1.5	17.0	0.12	7.95
2	19.62	0.0981	6.2

### 2.5.2 Ионы ГЕЛИЯ В АРГОНЕ

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0.025	2.19	0.626	41.5
0.038	2.69	0.735	48.7
0.05	3.11	0.825	54.6
0.063	3.47	0.918	60.8
0.075	3.8	1.043	69.1
0.088	4.12	1.127	74.6
0.1	4.39	1.205	79.8
0.14	5.22	1.458	96.6
0.375	8.5	1.03	68.2
0.5	9.82	0.9	59.6
0.75	12.04	0.7	46.4
1	13.9	0.58	38.4

### 2.5.3 Ионы ЛИТИЯ В АРГОНЕ

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0.015	1.685	0.717	47.5
0.021	2.03	0.874	57.9
0.029	2.35	1.032	68.3
0.036	2.625	1.15	76.2
0.043	2.87	1.269	84.0

0.05	3.1	1.382	91.5
0.052	3.15	1.4	92.7
0.056	3.28	1.46	96.7
0.057	3.32	1.47	97.35
0.061	3.43	1.517	100.5
0.064	3.52	1.565	103.6
0.065	3.55	1.58	104.6
0.069	3.65	1.625	107.6
0.073	3.75	1.66	109.9
0.135	5.1	2.23	147.7
0.16	5.5	2.34	155.0
0.22	6.5	2.41	159.6
0.255	7.0	2.37	157.0
0.285	7.4	2.32	153.6
0.31	7.7	2.29	151.7
0.32	7.8	2.28	151.0
0.33	7.98	2.25	149.0
0.35	8.2	2.23	147.7
0.36	8.32	2.22	147.0
0.36	8.35	2.21	146.4
0.37	8.46	2.2	145.7
0.39	8.68	2.175	144.0
0.47	9.5	2.09	138.4
0.52	10	2.03	124.4

#### 2.5.4 ИОНЫ БОРА В АРГОНЕ

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0.012	1.5	1.032	68.8
0.045	2.96	1.91	126.5
0.058	3.33	2.25	149.0
0.091	4.18	2.81	186.1
0.14	5.12	3.25	215.2
0.18	5.91	3.43	227.15
0.25	6.99	3.53	233.8
0.26	7.07	3.595	238.1
0.27	7.18	3.54	234.4
0.28	7.38	3.545	234.8
0.36	8.36	3.51	232.45
0.41	8.84	3.47	229.8
0.42	8.98	3.44	227.8
0.426	9.05	3.43	227.15
0.43	9.09	3.42	226.5
0.44	9.18	3.41	225.8

**2.5.6 ИОНЫ УГЛЕРОДА В АРГОНЕ**

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0.0052	1	1.22	80.8
0.021	2	1.99	131.8
0.0385	2.72	2.46	162.9
0.077	3.85	3.18	210.6
0.12	4.72	3.71	245.7
0.13	5	3.86	255.6

**2.5.7 ИОНЫ АЗОТА В АРГОНЕ**

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0.011	1.439	1.56	103.3
0.0125	1.552	1.689	111.85
0.014	1.66	1.779	117.8
0.018	1.857	2.01	133.1
0.021	2.03	2.17	143.7
0.025	2.19	2.37	157.0
0.029	2.35	2.58	170.9
0.033	2.51	2.75	182.1
0.0365	2.65	2.91	192.7
0.043	2.87	3.14	207.95
0.057	3.31	3.62	239.7
0.062	3.45	3.76	249.0
0.067	3.60	3.93	260.3
0.072	3.71	4.02	266.2
0.077	3.85	4.17	276.2
0.086	4.06	4.41	292.05
0.11	4.54	4.86	321.85
0.13	4.98	5.28	349.7
0.16	5.5	5.67	375.5
0.19	6.0	6.08	402.65
0.22	6.5	6.22	411.9
0.26	7.0	6.29	416.55
0.3	7.63	6.27	415.2
0.316	7.79	6.26	414.6
0.34	8.06	6.24	413.2
0.35	8.18	6.22	411.9
0.39	8.62	6.15	407.3
0.395	8.71	5.83	386.1
0.4	8.8	5.81	384.8
0.41	8.88	5.79	383.4
0.42	9.0	5.78	382.3
0.43	9.1	5.74	380.1
0.445	9.25	5.7	377.5

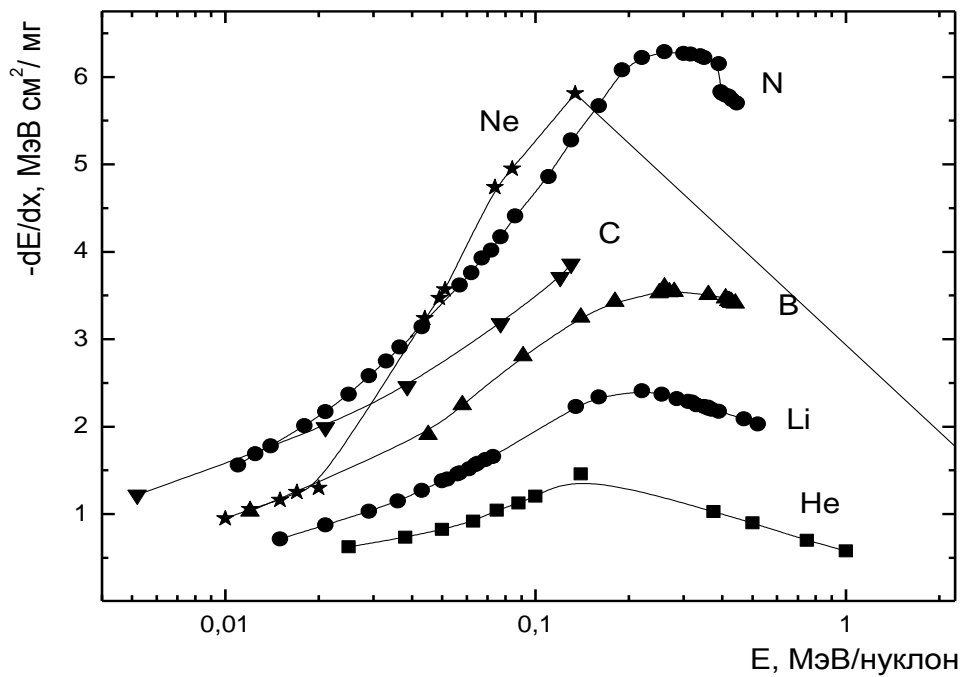
**2.5.8 Ионы НЕОНА В АРГОНЕ**

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0.01	1.39	0.951	63.0
0.012	1.55	1.057	70.0
0.015	1.70	1.162	77.0
0.017	1.83	1.253	83.0
0.02	1.97	1.299	86.0
0.044	2.92	3.24	214.6
0.049	3.06	3.47	230.0
0.051	3.13	3.57	236.4
0.074	3.77	4.74	313.9
0.084	4.03	4.95	327.8
0.134	5.07	5.81	343.0

**2.5.9 Ионы КРИПТОНА В АРГОНЕ**

E , МэВ/нуклон	V , 10 <sup>8</sup> см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ см <sup>2</sup> /мкг	10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> / атом
0.0013	0.5	3.08	204.0
0.0052	1	5.46	361.6
0.019	1.89	4.51	298.7
0.022	2.04	3.97	262.9
0.023	2.11	3.62	239.7
0.026	2.24	3.91	258.9
0.03	2.41	4.62	306.0
0.047	3	7.53	498.7
0.064	3.5	10.07	666.9
0.19	6	21.35	1413.9
0.033	8	27.75	1837.75

**2.5.10 ИЛЛЮСТРАЦИИ: ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ (-dE/dx) РАЗЛИЧНЫХ ИОНОВ (УКАЗАНЫ НА РИСУНКЕ) В АРГОНЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭНЕРГИИ ИОНОВ**



## 2.6 ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ИОНОВ В БЕНЗОЛЕ

### 2.6.1 Ионы водорода в бензоле

E , МэВ/нуклон	V , $10^8$ см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ $\text{cm}^2/\text{мкг}$	$10^{-15}$ эВ $\text{cm}^2/\text{атом}$
0.05	3.11	1,008	129.2
0.075	3.8	1,012	129.7
0.1	4.39	1,018	130.5
0.15	5.38	0,9	115.4
0.2	6.21	0,788	101.0
0.25	6.93	0,69	88.5
0.4	8.76	0,513	65.8
0.6	10.74	0,394	50.5

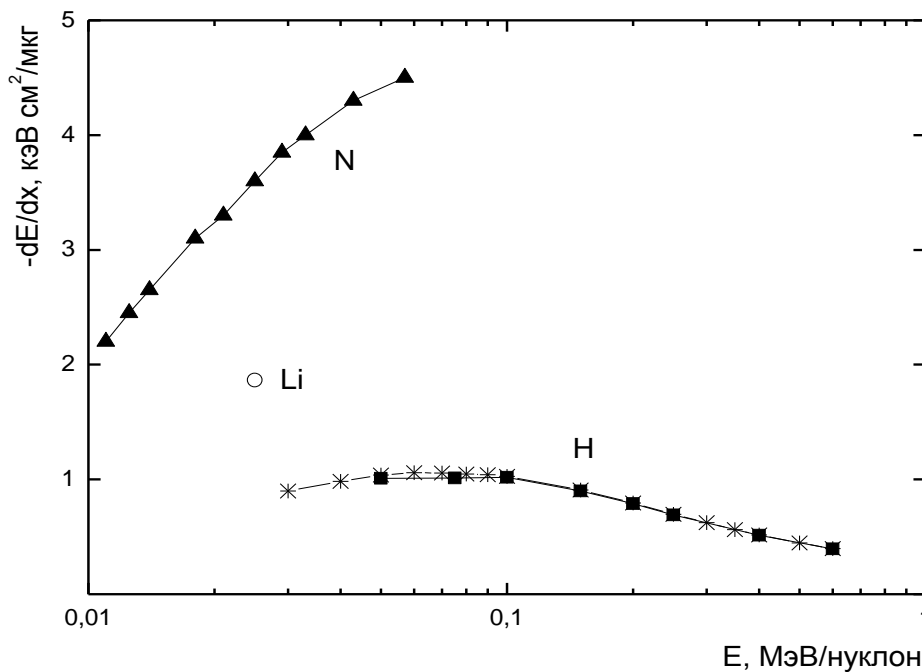
### 2.6.2 Ионы азота в бензоле

E , МэВ/нуклон	V , $10^8$ см/сек	ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, -dE/dx	
		кэВ $\text{cm}^2/\text{мкг}$	$10^{-15}$ эВ $\text{cm}^2/\text{атом}$
0.011	1.439	2.95	378.2
0.0125	1.552	3.21	411.5
0.014	1.66	3.39	434.6
0.018	1.857	3.71	475.6
0.021	2.03	3.955	507.05

0.025	2.19	4.21	538.05
0.029	2.35	4.75	609.0
0.033	2.51	4.7	602.6
0.043	2.87	5.275	676.3
0.0365	2.65	4.91	629.5

#### 2.6.4 ИЛЛУСТРАЦИИ: ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ( $-dE/dx$ ) РАЗЛИЧНЫХ ИОНОВ (УКАЗАНЫ НА РИСУНКЕ) В БЕНЗОДЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭНЕРГИИ ИОНОВ

Сплошные символы – результаты данной работы, O – результаты из работы [26], □ – данные, приведенные в обзоре [6].



### 3. АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ИОНОВ В РАЗЛИЧНЫХ ГАЗАХ

Потери энергии ионов получены, в основном, в области малой энергии, где ( $-dE/dx$ ) пропорциональны скорости ионов, а также частично – в области максимума потерь энергии. Качественно энергетическую зависимость ( $-dE/dx$ ) можно представить в виде  $(-dE/dx) \approx v^n f(Z, Z_c)$ , где показатель степени  $n$  близок к 1 в области энергии  $\leq 0.2$  МэВ/нуклон, а при увеличении энергии сначала уменьшается до нуля, а затем становится отрицательным. Положение максимума потерь энергии зависит как от  $Z$ , так и от  $Z_c$ . Так,

при увеличении заряда ядра налетающего иона  $Z$  от 2 до 7 максимум сдвигается в сторону большей энергии (примерно от 0.2 до 0.4 МэВ/нуклон в воздухе и от 0.1 до 0.3 МэВ/нуклон в аргоне). При увеличении  $Z_c$  максимум  $(-dE/dx)$  сдвигается в область меньших энергий. Так, для потерь энергии ионов лития в гелии максимум наблюдается при 0.32 МэВ/нуклон, в воздухе – при 0.25 МэВ/нуклон, а в аргоне – при 0.2 МэВ/нуклон.

### 3.1 НЕМОНОТОННОСТЬ ЗАВИСИМОСТИ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ОТ ЗАРЯДА ЯДРА НАЛЕТАЮЩЕГО ИОНА

Из результатов, полученных в различных газовых мишенях, следует возрастание потерь энергии с увеличением заряда ядра налетающего иона. Исключение составляют ионы неона, для которых в области малой энергии потери энергии меньше, чем для ионов азота во всех рассмотренных газовых мишенях, что подтверждает немонотонный характер зависимости потерь энергии от заряда налетающего иона.

Наиболее полно представлены потери энергии в воздухе для ионов с зарядом ядра от  $Z=2$  до  $Z=18$ , и дополнительно для  $Z=36$ . Систематические экспериментальные исследования потерь энергии ионов в воздухе позволяют рассмотреть зависимость потерь энергии от заряда ядра налетающего иона. На рис. 3.1 подобная зависимость, представленная для двух значений энергии налетающих ионов, имеет явно немонотонный характер.

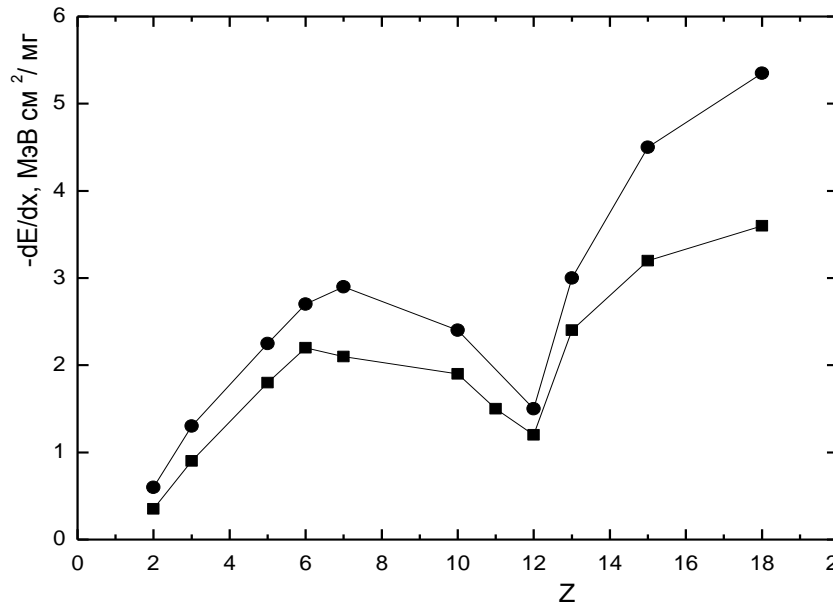


Рис.3.1. Потери энергии  $(-dE/dx)$  в воздухе в зависимости от заряда ядра налетающих ионов  $Z$ . Экспериментальные данные: (●) – энергия ионов 0.02 МэВ/нуклон, (■) – энергия ионов 0.01 МэВ/нуклон. Сплошные линии проведены для удобства анализа.



Традиционно немонотонность изменения энергетических потерь с увеличением заряда ядра иона связывают с оболочечной электронной структурой ионов, что в первом приближении предполагает минимальные значения потерь энергии для ионов Ne, имеющего полностью заполненные электронные оболочки. Однако, в представленных нами экспериментальных результатах минимум потерь энергии соответствует ионам Mg с  $Z=12$ , что согласуется с данными для потерь энергии ионов в углероде при  $V=V_0$ , приведенными в [15]. Необходимо отметить, что традиционная модель Фирсова [8], в которой потери энергии ионов возникают за счет переноса электронами импульса через поверхность (плоскость), разделяющую налетающий ион и атом мишени, предполагает монотонное возрастание потерь энергии с увеличением как заряда ядра налетающего иона, так и заряда ядра атома мишени. Однако модифицированная теория Фирсова, в которой поток электронов через плоскость рассчитывается для отдельных электронных оболочек, а затем суммируется по всем оболочкам, вклад которых существенен, позволяет качественно описать немонотонную зависимость  $S(Z)$ , причем минимум потерь энергии наблюдается при  $Z=11-12$  [15].

### 3.2 СИММЕТРИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ОТНОСИТЕЛЬНО ЗАРЯДОВ ЯДРА НАЛЕТАЮЩЕГО ИОНА И АТОМА МИШЕНИ

Рассмотрение потерь энергии ионов, проведенное в рамках теории Фирсова, предполагало многократный переход электронов в медленно движущейся системе, когда ион и атом мишени равноправны. Из этого вытекает, что значения потерь энергии в симметричных относительно ядерных зарядов иона  $Z$  и атома мишени  $Z_c$  соударениях ( $Z \rightarrow Z_c$ ) и ( $Z_c \rightarrow Z$ ), близки по величине. На основе экспериментальных данных этот факт впервые был отмечен в работе [22]. В таблице 1 представлены потери энергии ионов He, N и Ar в симметричных процессах. При анализе полученных результатов отмечалось, что совпадение величин потерь энергии в рассмотренных процессах наблюдается главным образом при малых скоростях ( $V \leq 4 \cdot 10^8$  см/с). При увеличении скорости ионов эффективный заряд возрастает, симметрия системы ион-атом мишени нарушается, и возникает расхождение в величинах потерь энергии  $S(Z \rightarrow Z_c)$  и  $S(Z_c \rightarrow Z)$ .

Таблица 1

V, 10 <sup>-8</sup> см/с	dE/dx, 10 <sup>-15</sup> эВ см <sup>2</sup> /атом			
		N в аргоне	Ar в воздухе	N в гелии

2.6	170±17	170±20	30.5±3.0	29.2±1.5
3.2	195±15	210±20	36.6±3.0	34.3±1.7
4	250±20	250±20	46.1±4.0	38.1±1.9

В последнее время вопросы, связанные с симметрией потерь энергии, активно обсуждаются в работах П.Зигмунда [11]. На основе анализа большого количества экспериментальных данных из [12] проводится сравнение потерь энергии  $S(Z \rightarrow Z_c)$  и  $S(Z_c \rightarrow Z)$  как для газовых мишеней, так и в твердых веществах. Если ограничиться обсуждением газовых мишеней, являющихся предметом рассмотрения данной работы, то в работе [11] отмечалось подтверждение симметрии потерь энергии (He-N<sub>2</sub>  $\leftrightarrow$  N-He) вплоть до энергии 0.08 МэВ/нуклон и (He-Ne  $\leftrightarrow$  Ne-He) – до 0.02 МэВ/нуклон. Для процесса (Ne-N<sub>2</sub>  $\leftrightarrow$  N<sub>2</sub>-Ne) значения потерь энергии расходятся во всем интервале скоростей, равно как и для процессов с участием водорода. Таким образом, в некоторых случаях симметрия потерь энергии  $S(Z \rightarrow Z_c)$  и  $S(Z_c \rightarrow Z)$  выполняется в более широком, чем ожидалось, интервале энергии, а в некоторых случаях не выполняется. При этом необходимо отметить, что между экспериментальными данными, полученными различными авторами, заметны существенные расхождения.

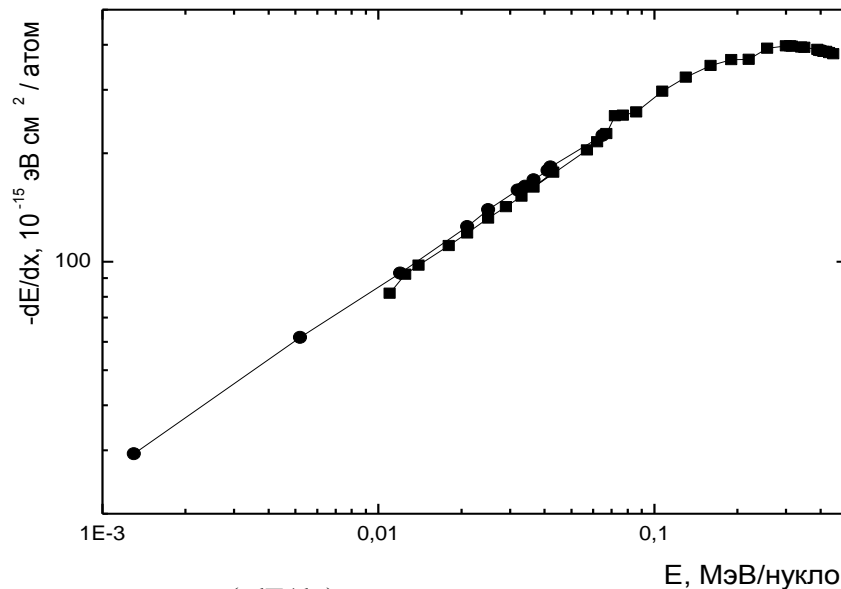


Рис. 3.2. Потери энергии ( $-dE/dx$ ) в зависимости от энергии ионов. Экспериментальные данные: для ионов Ag в воздухе (●), для ионов азота в аргоне (■). Сплошные линии проведены для удобства анализа.

Результаты данной работы для потерь энергии в процессе (N-Ar  $\leftrightarrow$  Ar-воздух), представленные на рис. 3.2, подтверждают выводы работ [11,22] о совпадении потерь энергии в симметричных процессах, причем это положение остается справедливым вплоть до энергии ионов 0.08 МэВ/нуклон. Необходимо отметить, однако, что зарядовая симметрия потерь энергии в общем случае не обоснована теоретически, за исключением приближений [8,9], не учитывающих электронной оболочечной структуры атомов и ионов.

### 3.3 НАРУШЕНИЕ ПРАВИЛА АДДИТИВНОСТИ ПРИ ПОТЕРЯХ ЭНЕРГИИ ИОНОВ В УГЛЕВОДОРОДНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

Самым простым приближением в определении потерь энергии ионов в молекулярных газах является правило Брэгга, согласно которому атомы, входящие в молекулы газов мишени, рассматриваются как независимые с точки зрения их вкладов в потери энергии.

$$S(\text{молекула}) = \sum_i v_i S_i(\text{атом}) \quad (10)$$

где  $S_i(\text{атом})$  – парциальные потери энергии на атоме элемента  $i$ , а  $v_i$  – количество таких атомов в молекуле. Экспериментальные результаты показывают, однако, что правило Брэгга не всегда является хорошим приближением, особенно при низкой энергии налетающих частиц [25,26]. Поэтому было предложено потери энергии в молекулярных мишенях представить в виде разложения:

$$S(\text{молекула}) = \sum_i S_i(\text{группа}) \quad (11)$$

$S_i(\text{группа})$  – это парциальные потери энергии на характерных группах, которые образуют молекулы. Они содержат некоторое количество атомов и соответствующих атомных связей, что позволяет учесть специфику различных химических связей. Приведенное уравнение может рассматриваться, как правило аддитивности не для свободных атомов (правило Брэгга), а для характерных молекулярных групп.

Систематическое исследование потерь энергии различных ионов (Li, B, N) в метане является важным для дальнейшего анализа потерь энергии в различных углеводородах, поскольку все они содержат в своем составе C-H группы. В молекуле метана атом углерода связан с четырьмя атомами водорода, что позволяет непосредственно из экспериментальных данных рассчитать потери энергии, приходящиеся на C-H группу:  $S(\text{C-H}) = S(\text{CH}_4)/4$ .

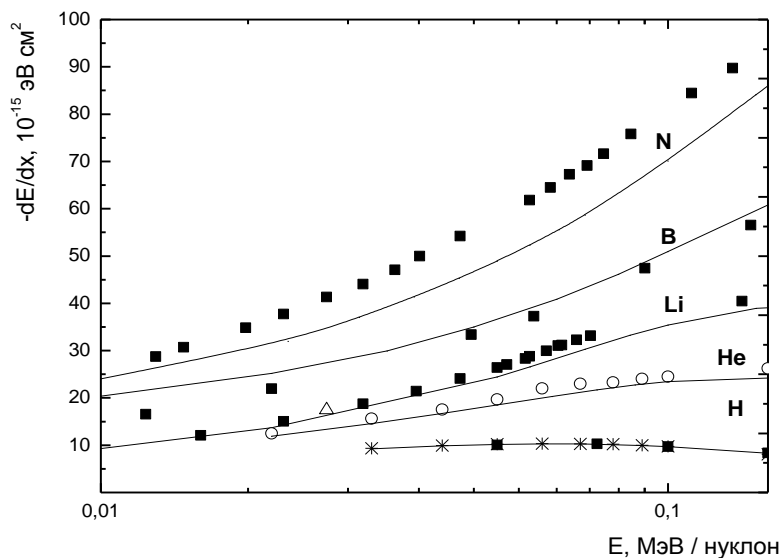


Рис.3.3. Потери энергии, приходящиеся на С-Н группу, при торможении различных ионов в метане ( $\text{CH}_4$ ) в зависимости от энергии ионов: ■ – результаты данной работы;  $\Delta$  – данные из работы [25],  $\circ$  – получены из материалов работы [12],  $\square$  - получены из результатов, приведенных в [6]. Сплошные кривые рассчитаны по правилу Брэгга (10) на основе данных SRIM-2006.

На рис.3.3 представлены потери энергии, приходящиеся на одну С-Н группу, рассчитанные из экспериментальных данных, в зависимости от энергии ионов. Из рисунка видно, что экспериментальные результаты совпадают с результатами расчетов по правилу Брэгга (10) для легких ионов (H, He), но различаются для более тяжелых ионов, причем это различие усиливается с увеличением заряда ядра налетающего иона. Возможно, это связано с усложнением электронной структуры налетающих ионов, что приводит к усилению влияния химических связей на потери энергии и необходимости учета особенностей молекулярной структуры мишени.

Действительно, в молекулярных соединениях минимальная энергия стационарного состояния молекулы отличается от суммы энергий стационарных состояний отдельных атомов [28] за счет выделения энергии при образовании химических связей. Показателем прочности двойной связи является уменьшение равновесного расстояния между двумя атомами углерода от  $1.54 \text{ \AA}$  в этане (одинарная связь) до  $1.34 \text{ \AA}$  в этилене (двойная связь) и  $1.20 \text{ \AA}$  в ацетилене (тройная связь). Заметим, что уменьшение межатомного расстояния происходит нелинейно, поскольку при образовании кратных связей (двойных или тройных) валентные электроны атомов участвуют в образованиях связей неравноправно. Кроме того, многие молекулы приобретают дополнительную устойчивость за счет того,

что некоторое число электронных пар распределяется равномерно между многими атомами, т.е. происходит делокализация отдельных связей. Характерным примером является молекула бензола  $C_6H_6$ , имеющая вид замкнутого кольца из шести СН групп, соединенных в правильный шестиугольник нелокализованной связью, электроны которой равномерно распределены по всему кольцу.

Таким образом, особый интерес представляет исследование потерь энергии ионов на различных углеродных группах. В молекулах углеводородов все электроны, за исключением двух  $1s$  электронов углерода, участвуют в С-Н, С-С, С=C, С≡С связях. В работе /10/, на основе анализа потерь энергии ионов He в различных углеводородах, было показано, что наибольшее отклонение от правила Брэгга наблюдается в том случае, когда ионы углерода связаны тройными связями (до 12.8%). В данной работе рассматриваются потери энергии на молекулярных мишенях, в которых каждый атом углерода связан с одним атомом водорода, и, кроме того, атомы углерода связаны тройной связью (ацетилен) или образуют замкнутую цепь с участием трех валентных электронов (бензол).

Приведенные на рис. 3.4 данные о потерях энергии, приходящихся на углерод-углеродную группу в бензоле  $\{ S(C\equiv C) = [S(C_6H_6) - 6S(C-H)]/3 \}$  хорошо согласуются с расчетами по правилу Брэгга (10) для протонов, а для ионов азота наблюдаются существенные различия. Для потерь энергии в ацетилене [6,27] заметно отклонение от правила Брэгга для величины потери энергии, приходящейся на С≡С группу,  $\{ S(C\equiv C) = S(C_2H_2) - 2S(C-H) \}$ , как для протонов, так и для ионов He в области энергии, соответствующей максимуму потерь энергии. К сожалению, экспериментальные данные о потерях энергии в бензоле крайне неполны (см.рис.2.6.4), а данные о потерях энергии в ацетилене, также как и в других углеводородных соединениях, ограничиваются, в основном, относительно легкими налетающими частицами (H, He), что затрудняет более подробный анализ.

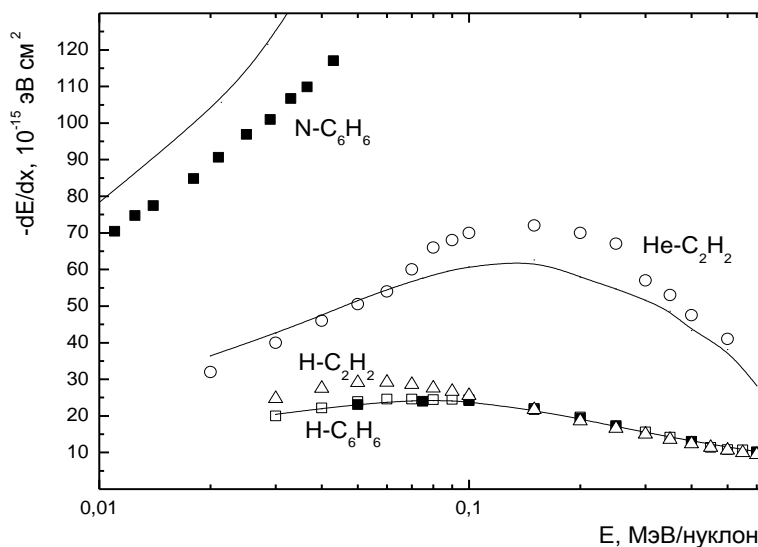


Рис. 3.4. Потери энергии, приходящиеся на С-С группу, соединенную тройной связью, при торможении различных ионов в зависимости от энергии ионов в бензоле ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ) и ацетилене ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ): ■ – результаты данной работы; ○ – получены из данных, приведенных в [27]; □ и Δ - получены на основе результатов, приведенных в обзоре [6]. Сплошные кривые рассчитаны по правилу Брэгга (1) на основе данных SRIM-2006.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Собраны и систематизированы результаты экспериментальных исследований, проводившихся в НИИЯФ МГУ, по определению потерь энергии в столкновениях ионов с атомами газов. Представленные экспериментальные данные о потерях энергии большого числа ионов различной энергии в разных газах (He, воздух, Ar) позволили проанализировать зависимость потери энергии ( $-dE/dx$ ) от ядерного заряда ионов  $Z$ , а также симметрию потерь энергии относительно зарядов ядер налетающих ионов и атомов мишени. Подтвержден немонотонный характер зависимости потерь энергии от заряда налетающего иона  $Z$ . Установлено совпадение величины потерь энергии в процессах столкновения ( $\text{N-Ar} \leftrightarrow \text{Ar-воздух}$ ) в интервале энергии более широком, чем предполагалось ранее.

Анализ потерь энергии легких ионов в углеводородах подтвердил отклонение от правила аддитивности в области малой энергии ионов, связанное с необходимостью учета химических связей в молекулярных мишенях. Экспериментально установлено увеличение этого отклонения с увеличением заряда ядра налетающего иона. Наличие тройной углерод-углеродной связи усиливает отклонение потерь энергии от правила Брэгга, что наблюдается уже для протонов и  $\alpha$ -частиц.

Дальнейшие исследования потери энергии при малой энергии ионов, приобретает в последнее время особую актуальность в связи с расширением использования ионных пучков как в медицине (терапия с помощью пучков углерода), так и для изучения углеродных наноструктур, в которых расстояние между атомами углерода, например, в графене является предметом исследования.

## 5. ЛИТЕРАТУРА

1. N. Bohr // Phil. Mag. 1913. V.25. P.10.
2. H.A. Bethe // Ann. D. Phys. 1930. V.5. P.325.
3. F.Bloch // Zs. f. Phys. 1933. V.81. P.363.
4. E.Fermi, E.Teller // Phys. Rev. 1947. V.72. №5. P.399.
5. U.Fano // Phys. Rev. 1946. V.70. P.44.  
Phys. Rev. 1947. V.72. P.26.
6. S.K.Allison // Rev.Mod.Phys. 1958. V.30. P.1137.  
S.K.Allison and S.D.Warshaw // Rev.Mod.Phys. 1953. V.25. P.779.
7. L.C.Northcliffe, R.F.Schilling // Nuclear Data Tables. 1970. V.A7. P.233.
8. Фирсов О.Б. // ЖЭТФ. 1959. Т.36. С.1517.
9. J. Lindhard, M. Scharff // Phys. Rev. 1961. V.124. P.128.  
J. Lindhard, M. Scharff, H.E.Schiott // Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk. 1963. V.33. P.14.
10. Ziegler J.P., Biersack J.P. and Littmark U.// The Stopping and Range of ions in Solids. Pergamon Press. New York. 1985.  
J.F.Ziegler. Handbook of stopping cross-sections for energetic ions in all elements. Pergamon Press, New-York, vol.5, 1980.  
H.H.Andersen and J.F.Ziegler. Hydrogen. Stopping powers and ranges in all elements. Pergamon Press, New-York, vol.3, 1977.
11. Sigmund P. // Phys.Rev.A. 1997. 56. №5. P.3781.  
P.Sigmund. *Stopping of heavy ions*, vol. 204 of Springer Tracts of Modern Physics (Springer, Berlin, 2004).  
P.Sigmund, Изв. РАН, Сер. физ. 2008. Т.72. №5, С.608 (in English).
12. H.Paul. Stopping power graphs, URL [www.exphys.uni-linz.ac.at/stopping/](http://www.exphys.uni-linz.ac.at/stopping/)
13. S.P.Ahlen // Phys.Rev.A. 1982. V.25. P.1856.
14. Akhiezer I.A., Davydov L.N. // Radiation Effects.1979. V.40. P.53.

15. М.Комаров, Ф. Кумахов. *Phys.Stat.Sol (b)* 1973. V.58. P.389.  
М.А.Кумахов, Ф.Ф.Комаров. Энергетические потери и пробеги ионов в твердых телах.- Мн.:Изд-во БГУ, 1979. 320 с.
16. Latta В.М., Scanlon // *Phys.Rev.A*. 1975. V.12. p.34.
17. N. Bohr // *Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk.* 1948. V.24. P.191.  
Н. Бор. Прохождение атомных частиц через вещество.- М. ИЛ. 1950.
18. И.С.Дмитриев, В.С.Николаев // *ЖЭТФ*. 1964. Т.47. С.615.
19. V.S.Nikolaev, I.S.Dmitiev // *Phys.Lett.* 1968. V.A28. P.277.
20. К.Х.То, R.Drouin // *Nucl.Instr.Methods*. 1979. V.160. P.461.
21. К.Shima, Т.Ishihara, Т.Mikumо // *Nucl.Instr.Methods*. 1984. V.B2. P.222.
22. Теплова Я.А., Николаев В.С., Дмитриев И.С., Фатеева Л.Н.// *ЖЭТФ*.1962.Т.42.№1.С.44.
23. Bloch F. // *Ann.Phys/ (Leipzig)*. 1933. 16. P.285.
24. Теплова Я.А. Торможение многозарядных ионов в твердых и газообразных средах.  
Диссертация НИИЯФ МГУ. 1962 г.
25. R.Kreutz, W.Neuwirth, W.Pietsch. *Phys.Rev.A*, 1980,V.22, №6. P.2606,
26. R.Kreutz, W.Neuwirth, W.Pietsch. *Phys.Rev.A* 1980,V.22, №6. P.2598.
27. P.D.Bourland, D.Powers. *Phys.Rev.B.*, 1970, V.3, №11, №11, P.3635.
28. У.Фано, Л.Фано. Физика атомов и молекул.- М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980



Яна Анатольевна Теплова, Юлия Александровна Белкова

## **ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ИОНОВ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ**

Препринт НИИЯФ МГУ №2010-1/858

Работа поступила в ОНТИ      1 апреля 2010