

УДК 539.186

## ИЗМЕНЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ПРИ ТОРМОЖЕНИИ В УГЛЕРОДЕ

© 2020 г. Ю. А. Белкова<sup>а,\*</sup>, Я. А. Теплова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: belkova-fiz@mail.ru

Поступила в редакцию 21.06.2019 г.

После доработки 15.07.2019 г.

Принята к публикации 20.07.2019 г.

При рассмотрении торможения быстрых тяжелых ионов в веществе до полной остановки принято во внимание, что уменьшение энергии по мере увеличения пройденного пути приводит к изменению потерь энергии ионов. На основе предложенной ранее степенной аппроксимации зависимости неупругих потерь энергии ионов от скорости рассмотрен процесс уменьшения энергии при прохождении ионов через вещество. Получена зависимость потерь энергии от пройденного пути для различной начальной энергии и зарядов ядер ионов при прохождении через углерод. Определена толщина слоя вещества, в котором потери энергии достигают максимальной величины, а также расстояние от поверхности углеродной мишени до области максимальных потерь энергии.

**Ключевые слова:** торможение ионов, потери энергии ионов, выделение энергии, пробеги ионов.

**DOI:** 10.31857/S102809602003005X

### ВВЕДЕНИЕ

Прохождение быстрых заряженных частиц (ионов) через вещество сопровождается потерями их энергии за счет взаимодействия с атомами среды. Изучение потерь энергии ионов различных элементов в разных средах является важным для определения изменения свойств как движущейся частицы, так и вещества, в котором происходит выделение энергии в результате замедления иона [1]. Интерес к этим явлениям связан с ускорением многозарядных ионов в современных ускорительных устройствах, а также с возможностью их практического применения для модификации материалов. Перспективным является использование быстрых тяжелых ионов для медицинской диагностики и лечения онкологических заболеваний.

При рассмотрении торможения быстрых тяжелых ионов в веществе до полной остановки необходимо учитывать, что уменьшение энергии ионов по мере увеличения пройденного пути приводит к изменению потерь их энергии. Программа SRIM [2] позволяет получить сведения о потерях энергии для конкретной пары ион–мишень при заданной энергии иона. Тогда торможение иона в веществе следует рассматривать поэтапно, пересчитывая потери энергии по мере уменьшения энергии иона. Поэтому актуальным является аналитическое описание зависимости потерь энергии от заряда ядра иона  $Z$ , его массы  $M$  и энергии  $E$ .

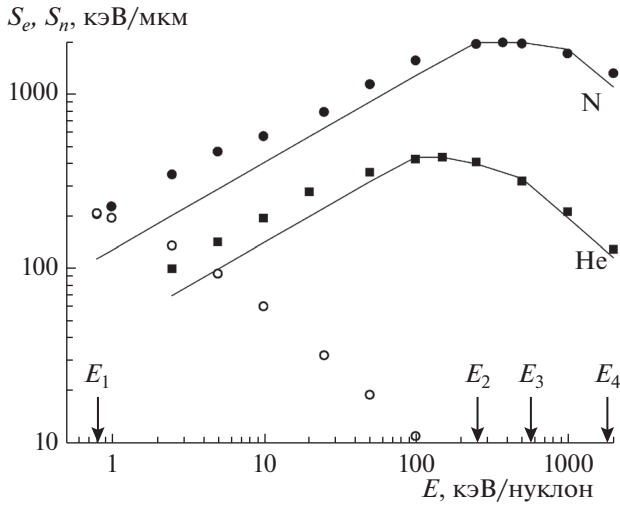
В настоящей работе на основе предложенной ранее степенной аппроксимации неупругих потерь энергии ионов [3, 4] представлено аналитическое выражение для зависимости потерь энергии ионов от энергии и, следовательно, от пути, пройденного ионами в веществе. Это позволило вычислить толщину слоя вещества (углерода), в котором потери энергии различных ионов достигают максимальной величины. Были определены также значения начальной энергии ионов ( $Z = 2–10$ ), при которых потери энергии оказываются максимальными в поверхностных слоях углерода или увеличиваются по мере прохождения ионов через вещество.

### МЕТОД РАСЧЕТОВ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для ионов с зарядами ядер  $Z = 2–10$  в области скоростей ионов  $V > V_0$  ( $V_0 = e^2/\hbar$ ) основную роль играют потери энергии, обусловленные взаимодействием ионов с электронами мишени:  $S_e = (-dE/dx)_e$ . Аналитическое, удобное при использовании выражение для потерь энергии получено в [3]:

$$-\frac{dE}{dx} = S_{e\max} a E^b, \quad (1)$$

где  $S_{e\max}$  – максимальная величина потерь энергии,  $a$  и  $b$  – постоянные коэффициенты, полученные на основе расчетов по программе SRIM для



**Рис. 1.** Зависимость упругих ( $S_n$ ) и неупругих ( $S_e$ ) потерь энергии ионов He и N в углероде от их энергии. Символы – данные SRIM:  $\circ$  –  $S_n$  и  $\bullet$  –  $S_e$  для ионов N;  $\blacksquare$  –  $S_e$  для ионов He. Сплошные кривые – результаты расчетов с помощью аппроксимации [3]. Значения энергии, разграничивающие области различной аппроксимации для ионов N, указаны стрелками.

различных областей, границы которых определены в [3]. На рис. 1 представлены результаты расчетов SRIM для потерь энергии ионов He и N в углероде ( $\rho = 2.253 \text{ г/см}^3$ ) и предложенные аппроксимации. В области малых скоростей ионов ( $E \sim E_1$ ) упругие и неупругие потери энергии сравнимы по величине. При увеличении энергии ионов ( $E_1 < E < E_2$ ) преобладают неупругие потери энергии, которые считают пропорциональными скорости ионов [5, 6]. Их можно выразить в виде:

$S_e = S_{e \max} \sqrt{\frac{E}{E_2}}$ . При некоторой энергии ионов

( $E_2 < E < E_3$ ) потери энергии достигают максимума и равны  $S_e = \text{const}$ . При дальнейшем возрастании энергии потери убывают с увеличением энергии ионов:

$S_e = S_{e \max} \left(\frac{E_3}{E}\right)^{1/6}$  при  $E_3 < E < E_4$ , а затем

$S_e = S_{e \max} \frac{E_3^{1/6} E_4^{7/12}}{E^{3/4}}$  при  $E > E_4$ . Полученные выражения согласуются с приближением Бете–

Блоха [7, 8], если учесть отличие среднего заряда ионов от зарядов ядер [9]. Значения  $S_{e \max}$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ,  $V_4$  приведены в [3]. Соответствующие значения энергии и скорости связаны между собой соотношением  $E_i [\text{кэВ/нуклон}] = 25 [\text{кэВ/нуклон}] \times \frac{V_i^2}{V_0^2}$ .

Так, для ионов He (рис. 1)  $S_{e \max} = 434 \text{ кэВ/мкм}$ ,  $E_2 = 95 \text{ кэВ/нуклон}$  ( $V_2 = 1.95V_0$ ),  $E_3 = 210 \text{ кэВ/нуклон}$  ( $V_3 = 2.9V_0$ ),  $E_4 = 400 \text{ кэВ/нуклон}$  ( $V_4 = 4.0V_0$ ). Для ионов N  $S_{e \max} = 1975 \text{ кэВ/мкм}$ ,

$E_2 = 234 \text{ кэВ/нуклон}$  ( $V_2 = 3.1V_0$ ),  $E_3 = 570 \text{ кэВ/нуклон}$  ( $V_3 = 4.8V_0$ ),  $E_4 = 1600 \text{ кэВ/нуклон}$  ( $V_3 = 8.0V_0$ ). Значения энергии, разграничивающие области различной аппроксимации для ионов N, на рис. 1 указаны стрелками. Из рисунка видно, что при увеличении зарядов ядер ионов  $Z$  не только максимум потерь энергии, но и области увеличения и уменьшения потерь энергии смещаются в сторону возрастания энергии ионов.

Решая уравнение (1) методом разделения переменных

$$\int_{E_0}^E \frac{dE}{E^b} = -aS_{e \max} x, \quad (2)$$

где  $E_0$  – начальная энергия иона,  $E$  – энергия иона после прохождения слоя вещества толщиной  $x$ , в рассмотренных энергетических областях получим:

$$\text{I: } E_0 < E_2, \quad a = 1/\sqrt{E_2}, \quad b = 1/2,$$

$$\sqrt{E} = \sqrt{E_0} - \frac{S_{e \max}}{2\sqrt{E_2}} x,$$

$$\text{II: } E_2 < E_0 < E_3, \quad a = 1, \quad b = 0, \quad E = E_0 - S_{e \max} x,$$

$$\text{III: } E_3 < E_0 < E_4, \quad a = E_3^{1/6}, \quad b = -1/6, \quad (3)$$

$$E^{7/6} = E_0^{7/6} - \frac{7}{6} S_{e \max} E_3^{1/6} x,$$

$$\text{IV: } E_4 < E_0, \quad a = E_3^{1/6} E_4^{7/12}, \quad b = -3/4,$$

$$E^{7/4} = E_0^{7/4} - \frac{7}{4} S_{e \max} E_3^{1/6} E_4^{7/12} x.$$

Полученные выражения (3) определяют убывание энергии  $E(x)$  по мере прохождения ионов через вещество.

На рис. 2 представлены результаты расчетов зависимости  $E(x)$  для ионов He и N в углероде для различных значений начальной энергии ионов  $E_0$ . При  $E_0 = 80 \text{ кэВ/нуклон}$  потери энергии ионов уменьшаются с увеличением пройденного пути (с уменьшением энергии) в случае обоих ионов. Энергия ионов убывает как

$$E(x) = E_0 - \sqrt{\frac{E_0}{E_2}} S_{e \max} x + \frac{(S_{e \max} x)^2}{4E_2}, \quad (4)$$

$$x < \frac{2\sqrt{E_2 E_0}}{S_{e \max}}$$

и становится примерно равной нулю при  $x_k = \frac{2\sqrt{E_2 E_0}}{S_{e \max}}$ . Как видно из рис. 2, при такой  $E_0$  энергия ионов N больше, чем ионов He, на всем пройденном пути. Толщина слоя вещества  $x_k$  превышает величину пробегов, рассчитанных по программе SRIM. Это превышение связано с тем, что в настоящей работе мы не рассматриваем

упругие потери энергии, которые увеличивают суммарные потери энергии при малых энергиях ионов ( $E < E_0$ ), что приводит к соответствующему уменьшению пройденного пути.

При начальной энергии ионов  $E_0 = 210$  кэВ/нуклон потери энергии ионов N описываются выражением (4), так как  $E_0 < E_2$  для N. Для ионов He ( $E_3 = 210$  кэВ/нуклон) потери энергии сначала остаются постоянными при уменьшении энергии (увеличении пройденного пути), и только после замедления ионов до  $E \leq E_2$  (при  $x \geq x_2$ ) они убывают при дальнейшем уменьшении энергии ионов. Зависимость  $E(x)$  для ионов He отражает два последовательных этапа торможения:

$$1. E_2 < E \leq E_0, \quad 0 \leq x < x_2 = \frac{E_0 - E_2}{S_{e \max}},$$

$$E(x) = E_0 - S_{e \max} x,$$

$$2. E \leq E_2, \quad x_2 \leq x < x_2 + \frac{2E_2}{S_{e \max}}, \quad (5)$$

$$E(x) = E_2 - S_{e \max}(x - x_2) + \frac{S_{e \max}^2(x - x_2)^2}{4E_2}.$$

Энергия иона стремится к нулю при  $x_k = x_2 + \frac{2E_2}{S_{e \max}} = \frac{E_0 - E_2}{S_{e \max}} + \frac{2E_2}{S_{e \max}} = \frac{E_0 + E_2}{S_{e \max}}$ .

При начальной энергии  $E_0 = 400$  кэВ/нуклон  $E(x)$  для ионов N определяется выражениями (5), а для ионов He ( $E_4 = 400$  кэВ/нуклон) зависимость потерь энергии от пройденного пути становится более сложной: сначала потери энергии возрастают по мере замедления иона, затем становятся постоянными, и только после замедления ионов до  $E \leq E_2$  они начинают убывать. Торможение ионов He при такой начальной энергии происходит в три этапа:

$$1. E_3 < E \leq E_0, \quad 0 \leq x < x_3 = \frac{6}{7} \frac{E_0^{7/6}}{S_{e \max} E_3^{1/6}},$$

$$E^{7/6}(x) = E_0^{7/6} - \frac{7}{6} S_{e \max} E_3^{1/6} x,$$

$$2. E_2 < E \leq E_3, \quad x_3 \leq x < x_2 = x_3 + \frac{E_0 - E_2}{S_{e \max}},$$

$$E(x) = E_3 - S_{e \max}(x - x_3), \quad (6)$$

$$3. E \leq E_2, \quad x_2 \leq x < x_k,$$

$$E(x) = E_2 - S_{e \max}(x - x_2) + \frac{S_{e \max}^2(x - x_2)^2}{4E_2},$$

$$x_k = x_2 + \frac{2E_2}{S_{e \max}} = x_3 + \frac{E_0 + E_2}{S_{e \max}}.$$

При малых  $x$  потери энергии ионов He меньше максимальных и постепенно возрастают по мере

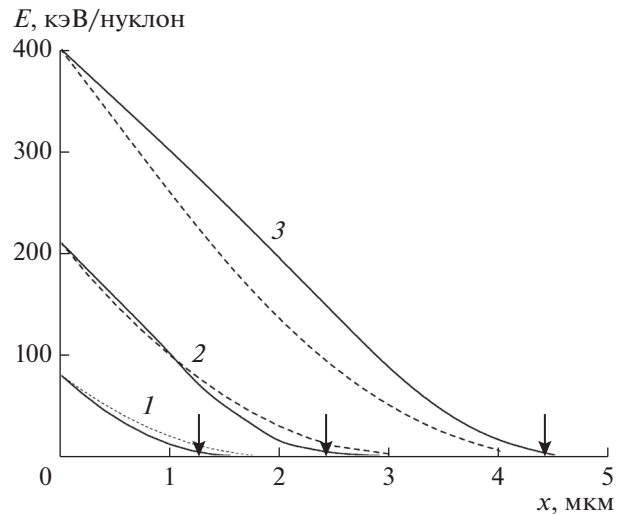
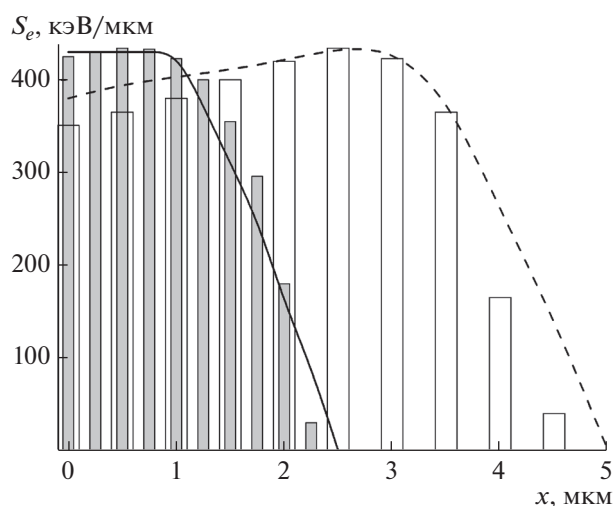


Рис. 2. Зависимость энергии  $E$  ионов He (сплошные линии) и N (пунктирные линии) от толщины пройденного слоя углерода  $x$  при их начальной энергии  $E_0$ : 1 – 80; 2 – 210; 3 – 400 кэВ/нуклон. Стрелками указаны величины пробегов ионов N в углероде (SRIM).

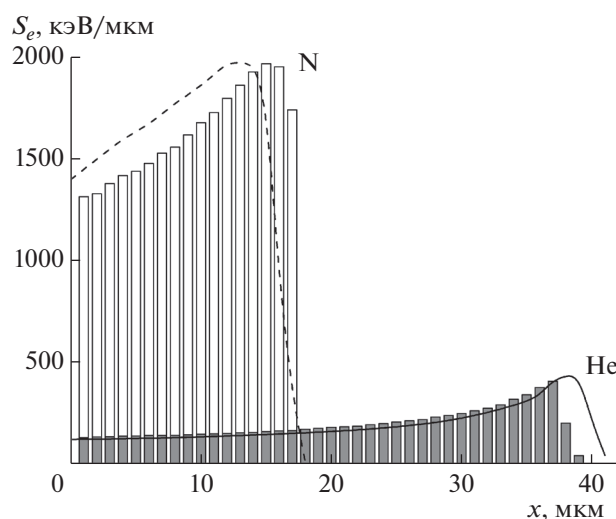
торможения иона. Энергия ионов He убывает медленнее, чем энергия ионов N, для которых замедление начинается с максимальной величины  $S_{e \max}$ .

Таким образом, по мере прохождения ионов через вещество убывание их энергии приводит к изменению потерь энергии в зависимости от величины пройденного слоя вещества  $x$ . Характер зависимости  $S_e(E(x))$  определяется начальной энергией ионов. На рис. 3 представлены потери энергии ионов He для различных  $E_0$ . При  $E_0 = 210$  кэВ/нуклон ( $E_0 = E_3$ ) потери энергии максимальны в начале прохождения через вещество ( $x < 1$  мкм), а затем уменьшаются по мере замедления ионов. При  $E_0 = 400$  кэВ/нуклон ( $E_0 = E_4$ ) потери энергии сначала возрастают и достигают максимальной величины при  $x = 2.5$  мкм и только после этого начинают убывать.

При одинаковом значении  $E_0$  характер зависимости  $S_e(x)$  определяется зарядами ядер ионов. На рис. 4 представлены потери энергии ионов He и N при  $E_0 = 2000$  кэВ/нуклон. Для обоих ионов  $E_0 > E_4$ , и, соответственно, потери энергии сначала возрастают при увеличении  $x$ , затем достигают максимума, а потом убывают по мере замедления ионов. Максимальные потери энергии ионов N существенно (примерно в четыре раза) превосходят максимальные потери ионов He. Потери энергии обоих ионов возрастают до величины  $S_{e \max}$  в конце пробега. Область максимальных потерь энергии ионов N расположена на расстоянии  $x \sim 14.5$  мкм, а ионов He – на расстоянии  $x \sim 37$  мкм от поверхности мишени. Отметим, что



**Рис. 3.** Неупругие потери энергии ионов He в зависимости от толщины пройденного слоя углерода: сплошные линии – результаты расчетов настоящей работы для начальной энергии ионов  $E_0 = 210$  кэВ/нуклон; пунктирные линии – для  $E_0 = 400$  кэВ/нуклон; прямоугольники – данные SRIM.



**Рис. 4.** Неупругие потери энергии ионов He и N с начальной энергией  $E_0 = 2000$  кэВ/нуклон в зависимости от толщины пройденного слоя углерода: сплошные линии – расчеты настоящей работы для ионов He; пунктирные линии – для ионов N; прямоугольники – данные SRIM.

потери энергии ионов N в начале торможения  $S_{e0}$  меньше  $S_{e \max}$  примерно в 1.4 раза, а ионов He – в 3.7 раза.

Таким образом, область максимальных потерь энергии зависит от начальной энергии иона и смещается в сторону увеличения толщины  $x$  по мере возрастания  $E_0$ . При одинаковой начальной энергии увеличение зарядов ядер ионов приводит к возрастанию  $S_{e \max}$ , причем максимум потерь энергии достигается при меньших толщинах пройденного слоя вещества  $x$ . Интервал значений  $x_3 < x < x_2$ , в котором  $S_e \approx S_{e \max}$ , может быть определен с помощью выражений (4)–(6). В таблице 1 приведены значения  $x_3$  и  $x_2$ , рассчитанные для

**Таблица 1.** Толщины пройденного слоя вещества, ограничивающие область максимальных потерь энергии при начальной энергии ионов  $E_0 = 2000$  кэВ/нуклон, отношение максимальных потерь энергии и начальных потерь энергии при данной  $E_0$

$Z$	2	5	6	7	8	10
$x_3$ , мкм	37.0	16.5	13.30	12.0	11.0	8.0
$x_2$ , мкм	38.0	18.5	15.20	14.2	13.2	11.2
$S_{e \max}/S_{e0}$	3.7	1.7	1.55	1.4	1.2	1.1

ионов с  $Z = 2–10$  при начальной энергии  $E_0 = 2000$  кэВ/нуклон. Для характеристики изменения потерь энергии по мере торможения ионов приведены также отношения величин  $S_{e0}$  и  $S_{e \max}$ .

## ВЫВОДЫ

Представлен полуэмпирический метод расчета неупругих потерь энергии ионов с учетом убывания их энергии при торможении в веществе. Получены аналитические выражения для зависимости энергии ионов от толщины пройденного слоя вещества  $x$ . Проанализирована зависимость потерь энергии ионов от  $x$  при различной начальной энергии ионов. Показано, что если  $E_0$  не превышает определенного значения, то потери энергии максимальны при малых  $x$ . Увеличение  $E_0$  приводит к смещению области максимальных потерь энергии вглубь вещества.

С помощью полученных выражений рассчитаны зависимости  $E(x)$  для ионов с  $Z = 2–10$  в углероде при различной начальной энергии  $E_0$ . На основе проведенных расчетов представлена зависимость потерь энергии ионов He и N от пройденного слоя вещества  $S_e(x)$  в углеродной мишени при различных  $E_0$ . Для ионов с  $Z = 2–10$  определена область изменения  $x$ , в которой потери их энергии достигают максимальной величины.

Полученные результаты могут быть использованы для расчетов энергии, выделенной при торможении ионов в веществе. Эта информация позволяет определить тип используемого иона и его начальную энергию в зависимости от желаемого

результата (максимальное выделение энергии в поверхностном слое или в глубине мишени).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бор Н. Прохождение атомных частиц через вещество. М.: Изд-во иностр. лит., 1950. 158 с.
2. Ziegler J.F. SRIM: the Stopping and Range of Ions in Matter (www.srim.org).
3. Белкова Ю.А., Теплова Я.А. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2018. № 8. С. 43.
4. Belkova Yu.A., Teplova Ya.A. // Rad. Effects. 2018. V. 173. № 3–4. P. 175. <https://doi.org/10.1080/10420150.2018.1462365>
5. Lindhard J., Sharff M., Schiott H.E. // Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk. 1963. V. 33. P. 14.
6. Фурсов О.Б. // ЖЭТФ. 1959. Т. 36. С. 1517.
7. Bethe H.A. // Ann. D. Phys. 1930. V. 5. P. 325.
8. Bloch F. // Z. Phys. 1933. B. 81. S. 363.
9. Shima K., Ishihara T., Mikumo T. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 1984. V. 2. P. 222.

## Change in Energy Losses for Heavy Ions during Deceleration in Carbon

Yu. A. Belkova<sup>1, \*</sup>, Ya. A. Teplova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, 119991 Russia

\*e-mail: belkova-fiz@mail.ru

When considering the deceleration of fast heavy ions in matter to a full stopping, it is taken into account that a decrease in energy with an increase in the ion path results in a change in the energy losses for ions. Based on the previously proposed power-law approximation of the dependence of inelastic ion energy losses on velocity, the process of energy decreasing during the passage of ions through a matter is considered. The dependence of the energy losses on the ion path is obtained for various initial energies and nuclear charges of ions passing through carbon. The thickness of the layer of matter, in which the energy loss reaches its maximum value, is determined, as well as the distance from the surface of the carbon target to the region of maximum energy loss.

**Keywords:** ion deceleration, ion energy loss, energy release, ion range.