

причем поперечная температура электронов равна их продольной температуре.

2. В тех случаях, когда центр протекающего по плазме тока сильно смещен к внутренней стенке камеры, наблюдается существенное превышение продольной температуры, вычисленной по проводимости плазмы, над поперечной, измеренной по диамагнитному эффекту.

3. Поперечная температура плазмы растет только до максимума тока разряда.

4. Наблюдаемое перед развитием неустойчивости перемещение центра тока к внешней стенке разрядной камеры нельзя объяснить нагревом плазмы.

В заключение автор выражает благодарность Л. А. Арцимовичу, по инициативе которого были поставлены эти эксперименты; В. Д. Шафранову за многочисленные обсуждения; Е. П. Горбунову и В. С. Муховатову,

принимавших участие в измерениях характеристик плазмы на установке «Токамак-5», а также В. С. Горячкину и А. С. Капралову за помощь в работе.

Поступила в Редакцию 8/XII 1965 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С. И. Брагинский, В. Д. Шафранов. В сб. «Физика плазмы». Т. II, М., Изд-во АН СССР, 1958, стр. 26.
2. Л. А. Арцимович. Управляемые термоядерные реакции. М., Госатомиздат, 1963.
3. Б. М. Григорович, В. С. Муховатов. «Атомная энергия», 17, 177 (1964).
4. Koji Uo. Phys. Fluids, 8, 384 (1965).
5. Е. П. Горбунов. Доклад № 246, представленный СССР на Международную конференцию по физике плазмы (Калэм, 1965).
6. Л. А. Арцимович и др. «Атомная энергия», 17, 170 (1964).

## Прохождение осколков деления $U^{235}$ через $H_2$ , $D_2$ , $He$ , $N_2$ , $Ar$ , $Kr$ , $Xe$

Ф. НАСЫРОВ, С. В. ЛИНЕВ

УДК 539.473.8:539.171

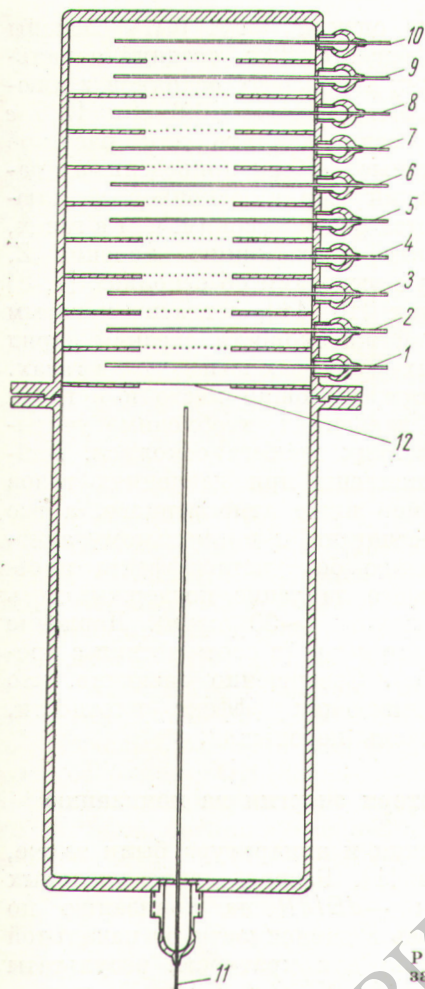
Экспериментально исследован средний пробег наиболее вероятных осколков деления тяжелой и легкой группы. Измерено распределение удельных потерь энергии на ионизацию по треку в зависимости от начальной энергии осколков деления. Результаты измерений сравниваются с расчетными значениями пробега и потерь энергии осколков на единицу длины трека.

Осколки деления, проходя через вещество, теряют свою энергию главным образом на ионизацию атомов среды и в меньшей степени на столкновения с ядрами. Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию среднего пробега и удельных потерь энергии осколков деления  $U^{235}$  на ионизацию в газах. Эти исследования представляют интерес вследствие существенных отличий осколков от других заряженных частиц.

### Средний пробег осколков деления

Измерения проводились при помощи телескопа импульсных ионизационных камер (рис. 1), которые регистрировали осколки деления  $U^{235}$ , возникающие под действием тепловых нейтронов [1]. В опытах использовались газы чистой не хуже 99,9%. Давление исследуемого газа в телескопе камер устанавливалось

по возможности высоким, но позволяющим получать распределения импульсов промежуточных камер по амплитудам при помощи амплитудного анализатора в виде двух максимумов от двух групп осколков, регистрируемых при совпадении с импульсами камеры 10 (см. рис. 1). Затем давление поднималось до такой величины, при которой половина наиболее вероятных осколков тяжелой группы из-за малого пробега переставала создавать импульсы достаточной для совпадений амплитуды. Импульсы совпадения появлялся от осколка с наименьшим зарядом  $Z_{эфф} = e$  ( $e$  — заряд электрона) и длиной трека, простирающейся за половину высоты камеры 10. Это проверялось экспериментально по величине импульсов  $\alpha$ -частиц, летящих из слоя  $U^{235}$  в камеру 10. Давление газа и расстояние от слоя  $U^{235}$  до середины камеры 10 определяли среднюю длину пробега наиболее вероятных осколков тяжелой группы  $R_T$ . Аналогично измерялся пробег легких осколков при большем значении давления газа. На рис. 2 (кривые 1, 2, 3) показаны типичные распределения импульсов по амплитудам в камерах 6, 5, 4 соответственно, характеризующие распределения осколков по ионизации на единицу длины  $dn/dR$  и по массам. Кривая 1 получена при небольшом



Р и с. 1. Схема ионизационных камер.

давлении в телескопе камер (30 *торр*), при котором регистрируются все тяжелые (левый максимум) и все легкие осколки. Кривая 3

получена при давлении 53 *торр*, характеризующем средний пробег наиболее вероятных легких осколков в криптоне.

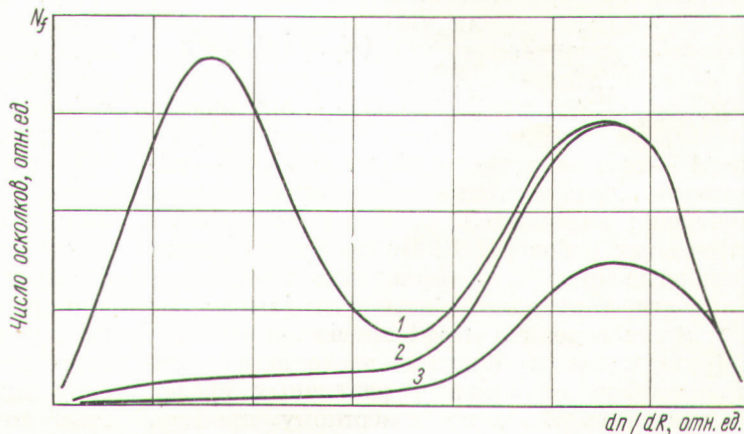
Ошибка опыта в основном обусловлена погрешностью в определении конца трека осколков в пределах высоты камеры 10 телескопа; по оценкам эта погрешность составляет  $\pm 3,5\%$  длины пробега ( $\pm 35\%$  высоты камеры). Она была получена с учетом возможного отклонения от  $e$ , среднего по треку в пределах последней камеры заряда осколка  $Z_{эфф}$ . В ошибку опыта входила также погрешность в измерении давления газа и ошибка, связанная с введением поправки, учитывающей среднее отклонение треков осколков от осевого направления телескопа камер.

Из результатов измерений, приведенных в табл. 1, видно, что пробег осколков в  $H_2$  отличается от пробега в  $D_2$ . Разница в пробегах не так велика, как в работе [2], и обусловлена

Экспериментальные и расчетные значения средних пробегов осколков деления  $U^{235}$  в газах

Газ	Эксперимент		Расчет	
	$R_{оск}, \text{мм}$		$R_{оск} = C \frac{AR_p}{Z_{эфф}^2}, \text{мм}$	
	легкие	тяжелые	легкие	тяжелые
$H_2$	$108 \pm 5$	$88 \pm 4$	104	91
$D_2$	$110 \pm 5$	$91 \pm 4$	—	—
He	$162 \pm 8$	$131 \pm 8$	163	131
$N_2$	$26,2 \pm 1$	$20,2 \pm 0,8$	27	19,3
Ar	$27 \pm 1$	$20,8 \pm 0,8$	27	19,3
Kr	$19,8 \pm 0,8$	$15,3 \pm 0,7$	20,6	15,3
Xe	$14,7 \pm 0,7$	$11,4 \pm 0,6$	15,3	11,1

Примечание. В Kr и Xe значение  $Z_{эфф}$  принято таким же, как и в Ar.



Р и с. 2. Распределение осколков деления  $U^{235}$  по удельной ионизации  $dn/dR$  в криптоне на расстоянии 9 мм от начала трека.

Длина пробега: 1 —  $12,5$  мм; 2 —  $17,5$  мм; 3 —  $19,8$  мм. Положение максимумов соответствует наиболее вероятным осколкам тяжелой и легкой групп.

характером ядерных столкновений, существенных в конце трека. Пробеги осколков в  $H_2$ ,  $D_2$ ,  $He$  и  $Ar$  превышают значения, приведенные в работе [3], на 10—15%. Авторам известна еще только одна экспериментальная работа [4], посвященная прохождению осколков деления через газы, однако в ней исследовались приведенные пробеги, поэтому нельзя провести прямое сравнение результатов.

Пробег осколков деления по отношению к пробегу протонов  $R_p$  или  $\alpha$ -частиц, обладающих одними и теми же начальными скоростями, не сохраняется постоянным для всех газов. Получены относительно большие значения пробега тяжелых и легких осколков в гелии и тяжелых осколков в  $H_2$ . Хорошо известно, что торможение осколков деления в этих газах по сравнению с другими газами происходит при меньших значениях заряда, так как  $Z_{эфф}$  зависит от свойств среды. Вследствие этого энергия осколка относительно меньше расходуется на ионизацию в начале пробега и тратится на большей длине трека. Оказалось, что выражение  $R_{оск} Z_{эфф}^2 / R_p$  с хорошей точностью сохраняется постоянным для всех газов. Эта связь была найдена ранее Бором [5] при проведении расчета в предположении, что скорость осколка и заряд  $Z_{эфф}$  уменьшаются линейно по треку, а пробег пропорционален начальной скорости. В его расчетах сравниваются пробеги осколков и  $\alpha$ -частиц. Настоящие эксперименты показали, что результаты расчетов лучше согласуются с опытом, если сравниваются пробеги осколков и протонов. Пробеги протонов и  $\alpha$ -частиц с одинаковыми начальными скоростями несколько различаются [6]. На основании экспериментальных данных можно подобрать постоянные коэффициенты  $C_L$  и  $C_T$ , позволяющие связать пробеги следующими равенствами:

$$R_L = C_L \frac{AR_p}{Z_{эфф}^2} = 2,7 \frac{AR_p}{Z_{эфф}^2} \quad (E_p = 1,0 \text{ Мэв});$$

$$R_T = C_T \frac{AR_p}{Z_{эфф}^2} = 3,3 \frac{AR_p}{Z_{эфф}^2} \quad (E_p = 0,5 \text{ Мэв}),$$

где  $A$  — массовое число осколка;  $Z_{эфф}$  — начальный заряд осколка в единицах заряда электрона; значения  $Z_{эфф}$  взяты из экспериментальных работ [7, 8]. Бором были сделаны примерные оценки коэффициента пропорциональности в предположении, что для легких и тяжелых осколков коэффициент одинаков.

Приведенные соотношения позволяют оценивать пробеги осколков в различных средах и определять  $Z_{эфф}$  по известному пробегу.

Очевидно, такие оценки могут быть сделаны и для твердых веществ. Так, средний начальный заряд легких и тяжелых осколков в алюминии должен быть больше 16,6  $e$  и 15,5  $e$  соответственно, если принять для расчетов экстраполированные пробеги, приведенные в работе [9]. Средний заряд осколков в алюминии оказывается более высоким, чем в газах, имеющих близкие к алюминию значения  $Z$ . Это согласуется с выводами об осколках [7, 8] и тяжелых ионах [10, 11], согласно которым при одной и той же скорости средний заряд частиц в твердых веществах выше, чем в газах. Эффект плотности, имеющий место и в газах при различных давлениях, необходимо учитывать при измерениях пробега осколков. Данные опыты выполнены при давлениях газов в телескопе камер ниже атмосферного, а все результаты пересчитаны к нормальному атмосферному давлению без учета эффекта плотности. Наименьшее давление поддерживалось в опытах с ксеноном ( $\sim 30$  торр). Давление других газов было выше (в соответствии с пробегами осколков). Совершенно очевидно, что поправка, учитывающая эффект плотности, должна быть очень небольшой.

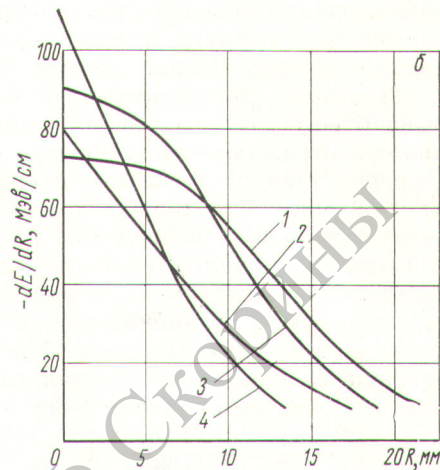
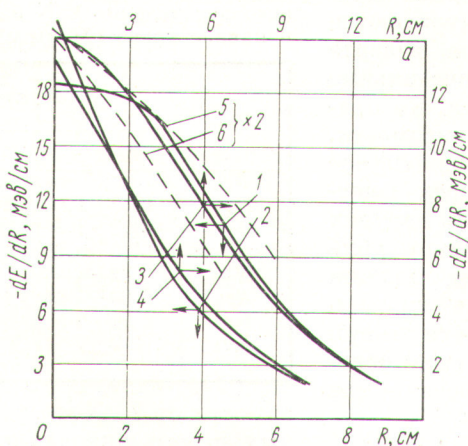
#### Удельные потери энергии на ионизацию

Метод измерения и аппаратура были те же, что и в работе [1]. Распределение удельных потерь энергии  $-dE/dR$  на ионизацию по треку измерялось в зависимости от начальной энергии осколков; для краткости результаты по ионизации в  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $Ar$ ,  $Kr$  и  $Xe$  приводятся только для наиболее вероятных осколков деления легкой и тяжелой групп (рис. 3). Характер зависимостей в этих газах приблизительно такой же, как в смеси  $Ar$  с  $CH_4$  (5%) [1], поэтому наиболее вероятные осколки отчасти характеризуют осколки всего диапазона начальных энергий. В гелии ход  $-dE/dR$  по треку несколько иной, поэтому экспериментальные результаты приводятся целиком (см. рис. 3, 4).

В опытах установлено, что на исследованной части трека потери энергии осколков на единицу длины в  $H_2$  и  $D_2$  с точностью до ошибки опыта одинаковы. Этот результат согласуется с выводами Лассена [2, 7]. Ошибка опыта при сравнении торможения осколков в  $H_2$  и  $D_2$  не превышала 2% и определялась погрешностью измерения давления газов, статистической ошибкой опыта и возможной нестабильностью аппаратуры.

Рис. 3. Потери энергии осколков деления  $U^{235}$  на единицу длины вдоль трека:

*a* — в  $H_2$  и  $He$ ; *б* — в  $N_2$  и  $Kr$ ; *в* — в  $Ar$  и  $Xe$ ; 1, 3 — легкие осколки; 2, 4 — тяжелые осколки; — — — расчет по формуле Бора зависимости  $-dE/dR$  от длины пробега по треку легких и тяжелых осколков в  $H_2$  (кривые 5 и 6 соответственно).



Как видно из рис. 3 и 4, тяжелые осколки в гелии обладают в начале трека меньшей величиной  $-dE/dR$  по сравнению с легкими. В других же газах подавляющая часть тяжелых осколков производит большую ионизацию в начале трека. Это главным образом относится к  $Ar$ ,  $Kr$  и  $Xe$  и в меньшей мере к  $H_2$  и  $N_2$ . В гелии характер хода  $-dE/dR$  по треку для тяжелых осколков мало отличается от легких осколков. Отмеченные особенности торможения осколков в гелии по сравнению с другими газами можно объяснить различием в изменении  $Z_{эфф}$  по треку осколков.

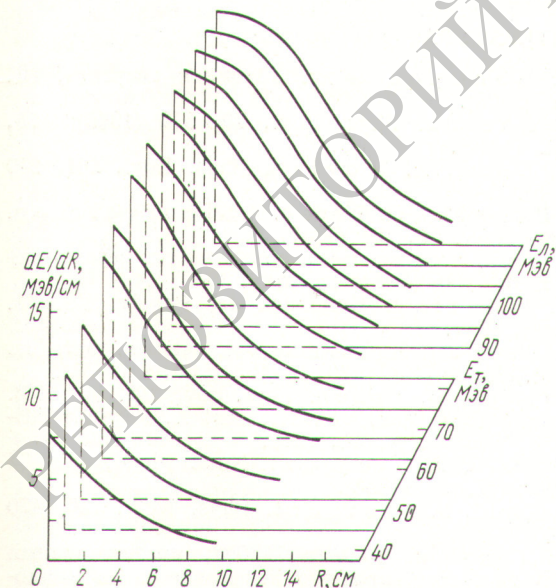
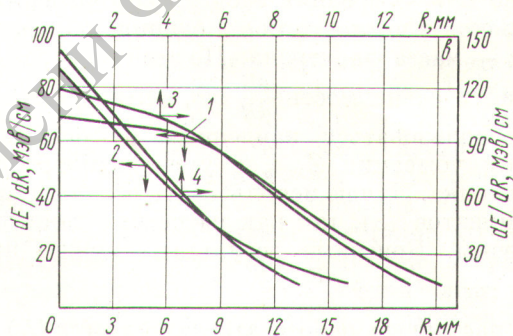


Рис. 4. Распределение по треку потерь энергии на единицу длины в  $He$  для осколков деления  $U^{235}$  с различными значениями начальной энергии легких и тяжелых осколков ( $E_L$  и  $E_T$  соответственно).

Результаты, относящиеся к чистому аргону, с точностью до ошибки опыта согласуются с данными работы [1], полученными ранее для смеси  $Ar$  с  $CH_4$  (5%).

Удельные потери энергии по треку осколков в  $H_2$ ,  $Ar$  и  $Xe$ , приведенные в работах Лассена [2, 7] и найденные в настоящей работе, отличаются до 20% на начальных участках трека и еще больше к концу трека. Расхождения в результатах для аргона и ксенона объясняются отчасти принятыми в работах Лассена заниженными значениями начальной энергии тяжелых и легких осколков  $U^{235}$  (52 и 87  $MeV$  соответственно), которые использовались для нормировки экспериментальных кривых  $-dE/dR(R)$ . В настоящих экспериментах значения начальных энергий были взяты из более поздних работ [12, 13] (около 68 и 100  $MeV$  соответственно).

Теория прохождения осколков деления через вещество, развитая Бором на основе классических представлений [5, 14], позволяет рассчитывать удельные потери энергии по треку. Хотя этому вопросу было посвящено много

Удельные потери энергии осколков деления  $U^{235}$  на ионизацию в газах в начале трека ( $Mэв/см$ ) Таблица 2

Газ	Эксперимент		Расчеты по теории Бора	
	легкие	тяжелые	легкие	тяжелые
$H_2$	$18,3 \pm 1,0$	$21,8 \pm 1,3$	10,6	10,4
$D_2$	$18,3 \pm 1,0$	$21,8 \pm 1,3$	—	—
He	$14,2 \pm 0,9$	$13 \pm 0,9$	7,0	7,5
$N_2$	$72 \pm 4$	$80 \pm 5$	—	—
Ar	$69 \pm 4$	$87 \pm 5$	—	—
Kr	$91 \pm 6$	$107 \pm 7$	—	—
Xe	$119 \pm 7$	$139 \pm 8$	—	—

работ, однако конечные результаты мало отличаются друг от друга, поэтому рассматриваются только расчеты Бора. Теория была развита с известными допущениями, и окончательные выводы ее считаются приближенными, но правильно отражающими основные зависимости. Выводы теории довольно просты в случае прохождения осколков деления через вещества с малыми значениями  $Z$ . Для других веществ из-за малой скорости осколков роль атомных электронов в торможении должна оцениваться в зависимости от их энергии связи и скорости осколков  $v$ . Удельные потери энергии осколков на электронные столкновения в  $H_2$ , согласно теории Бора, определяются

$$-\frac{dE}{dR} = \frac{4\pi Z Z_{эфф}^2 e^4 n}{mv^2} \ln \frac{1,123mv^3}{IZ_{эфф}e^2},$$

где  $I$ ,  $n$  — средняя энергия возбуждения электронов и число атомов в единице объема среды;  $m$  — масса электрона. По этой формуле можно найти зависимость  $\frac{dE}{dR}(v)$ , если задаться или воспользоваться найденным из опытов законом убывания  $Z_{эфф}$  с уменьшением скорости осколка. Лучше использовать результаты экспериментов [8], так как расчетные данные менее точны. Конечные результаты можно представить в виде  $\frac{dE}{dR}(R)$  благодаря полученным в настоящей работе зависимостям  $v(R)$  (точно так же, как и в работе [1]). Ошибка в определении  $dE/dR$ , связанная с использованием опытных данных, не превышает 20%. На рис. 3 показан расчетный и экспериментальный ход  $dE/dR$  по треку наиболее вероятных осколков деления в  $H_2$ . Расчетные кривые построены для скоростей осколков, превышающих характерную скорость  $v_0 = e^2/h$  в два и более раз, когда выполняются условия применимости формулы Бора. Ядерные столкновения не учитывались, так как при таких скоростях они вносят пренебрежимо малый вклад в торможение осколков.

В табл. 2 приведены экспериментальные и расчетные начальные значения  $-dE/dR$ , имеющие самостоятельный интерес, так как характеристики осколков в начале трека хорошо известны. Начальные значения  $-dE/dR$  в опыте находятся экстраполяцией к началу пробега кривых, построенных по экспериментальным точкам. Первая точка получается усреднением ионизации по начальному участку трека, составляющему ~4% всего трека.

Как видно из рис. 3 и табл. 2, расчеты правильно отражают изменение  $-dE/dR$  в зави-

симости от  $Z$ . Хотя расчетные значения удельных потерь энергии в полтора-два раза ниже экспериментальных, относительный ход кривых довольно хорошо совпадает. Однако расчеты торможения тяжелых осколков в гелии нельзя считать вполне справедливыми, так как выполняются не все условия применимости формулы Бора. Так как параметры соударения осколков с атомными электронами оцениваются в теории приближенно и могут быть подобраны, следует считать, что результаты расчета согласуются с экспериментальными данными. Очевидно, при торможении осколков тяжелыми атомами параметры соударения также могут подбираться с учетом опытных данных.

Поступила в Редакцию 14/VIII 1965 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. Насыров и др. «Атомная энергия», 19, 244 (1965).
2. N. Lassen. Phys. Rev., 70, 577 (1946); 75, 1762 (1949).
3. W. Good, E. Wollan. Phys. Rev., 101, 249 (1956).
4. J. Bøggild, O. Arrøe, T. Sigurgeirson. Phys. Rev., 71, 281 (1947).
5. Н. Бор. Прохождение атомных частиц через вещество. М., Изд-во иностр. лит., 1950.
6. W. Whaling. Handbuch der Physik. Bd. 34. Berlin, 1957.
7. N. Lassen. Kgl. danske vid. selskab. mat.-fus. medd., 25, 11 (1949); 26, 12 (1951); 30, 8 (1955).
8. Fulmer, B. Cohen. Phys. Rev., 109, 94 (1958).
9. Reactor Handbook. Vol. III. Part A, Physics. Editor H. Soodak. N. Y., 1962.
10. P. Roll, F. Steigart. Nucl. Phys., 16, 534 (1960); 17, 54 (1960).
11. P. Roll, F. Steigart. Phys. Rev., 120, 470 (1960).
12. Р. Лечман. Доклад № 592, представленный США на Международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1955).
13. J. Milton, J. Fraser. Canad. J. Phys., 40, 1626 (1962).
14. N. Bohr. Philos. Mag., 25, 10 (1913); 30, 58 (1915).