

3. При решении задач в условиях неопределенности исходных данных, не связанных с внешними возмущениями, всегда присутствует неточность в определении границы области самозащищенности, т.е. граница является размытой.

В заключение отметим, что подобные задачи решаются на заключительных этапах проектирования самозащищенных ядерных реакторов нового поколения для детерминистического обоснования их безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин А.М., Окунев В.С. Методика анализа областей самозащищенности реакторных установок. — Изв. вузов. Ядерная энергетика, 1995, № 5, с. 24—30.
2. Кузьмин А.М. Методы оптимизации ядерно-энергетических установок. М., МИФИ, 1985. 80 с.
3. Кузьмин А.М., Окунев В.С. Решение задачи оптимизации самозащищенных реакторов в условиях неопределенности исходной информации. — Атомная энергия, 1997, т. 82, вып. 4, с. 254—264.
4. Кузьмин А.М., Окунев В.С. Некоторые тенденции изменения физических характеристик быстрых реакторов при оптимизации с ограничениями на функционалы безопасности. — Там же, 1996, т. 80, вып. 6, с. 429—437.
5. Lehto W., Fryer R., Dean E. e.a. Safety analysis for the loss-of-flow and loss-of-heat-sink without scram tests in EBR II. — Nucl. Engng Design, 1987, № 101, p. 35—44.
6. Кузьмин А.М., Окунев В.С. Возможность сокращения размерности задачи оптимального проектирования самозащищенных реакторов. — Атомная энергия, 1997, т. 82, вып. 3, с. 178—184.
7. Кузьмин А.М., Окунев В.С. О роли температурных коэффициентов реактивности при наложении аварийных ситуаций типа ATWS в быстрых реакторах с жидкометаллическим теплоносителем. — Изв. РАН. Энергетика, 1996, № 5, с. 75—80.

Поступила в Редакцию 15.01.97

УДК 539.173

ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ И ЭФФЕКТ ПЛОТНОСТИ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ ПРИ РАЗНОЙ ЧАСТОТЕ СТОЛКНОВЕНИЙ

Рыков В.А. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского)

В связи с преобразованием ядерной энергии в когерентное оптическое излучение возрос интерес к исследованию процессов, происходящих при прохождении осколков деления через газовые среды. Влияние частоты столкновений на разные процессы связано с ролью возбужденных состояний электронных оболочек осколков в формировании их ионных зарядов. Вопрос этот встал вскоре после открытия деления ядер и периодически привлекал внимание исследователей. Несмотря на то, что за долгие годы накоплен значительный объем информации в области физики взаимодействия многозарядных ионов с веществом, во многих случаях остаются не до конца понятными даже качественно важные явления. В частности, нельзя не предъявить обоснованных претензий к выводам, которые сделаны на основании экспериментальных данных, полученных более 40 лет назад и относящихся к так называемому эффекту плотности в газе, связанному с частотой столкновений. В интерпретации результатов важное значение имело выдвинутое Н. Бором предположение о том, что при торможении осколков деления в среде равновесный заряд иона прямо пропорционален его скорости. Столь простая зависимость может не выполняться в реальных условиях, что и наблюдалось в более поздних экспериментах [1]. Это неизбежно приводило к изменению эффекта плотности, полученного при обработке результатов [2—4]. Он значительно уменьшится, если зависимость равновесного ионного заряда от скорости описать выпуклой функцией.

Конечно же, осколки деления не являются идеальным инструментом для проведения исследований по физике многозарядных ионов. Однако такие опыты обладают важной особенностью: помещая в газ источник и детектор, можно повышать давление

газа до сотен и тысяч паскалей, недоступных в экспериментах на ускорителях. А именно в этом интервале давления газа и наблюдался эффект плотности.

Цель настоящей работы — показать, что учет энергетических потерь осколков деления при нелинейной зависимости их ионного заряда от скорости существенно влияет на эффект плотности в воздухе и аргоне. Вследствие большого различия в экспериментальных данных о потере энергии осколков деления даже для одного и того же газа (см., например, обзор [5]) нами проделан опыт по ее измерению в воздухе, для аргона взяты результаты современных исследований [6,7].

Эффект плотности в газе. Ионный заряд многозарядного иона, например, осколка деления определяется как разность между зарядом ядра Z и числом принадлежащих ему электронов N : $q = Z - N$. Средний ионный заряд определяется как

$$\bar{q} = \int_{q_{\min}}^{q_{\max}} q f(q, x) dq, \text{ где } f(q, x) \text{ — нормированная на единицу функция распределения}$$

ионов по ионным зарядам. После попадания иона в вещество из-за конкуренции между захватом и потерей электронов эта функция будет стремиться к равновесному распределению, время установления которого много меньше времени существенного изменения скорости при торможении ионов. Зависимость от координаты x при этом обычно заменяют зависимостью от скорости иона. В дальнейшем под ионным зарядом будем понимать средний ионный заряд, а его зависимость от скорости всегда будет подразумеваться.

На захват и потерю электронов может оказывать влияние частота столкновений. Механизм этого явления заключается в том, что при малой частоте ион вступает в каждое следующее взаимодействие, когда его электронные оболочки находятся в основном состоянии. При увеличении частоты столкновений переходы в основное состояние после предыдущего взаимодействия не успевают совершаться. Согласно Н. Бору эффект плотности заключается в том, что возбужденные состояния приводят к возрастанию сечения потери электронов, т.е. к росту ионного заряда при той же скорости.

Эксперимент. В опытах по определению потерь энергии в газах возрастание толщины слоя вещества часто имитируется увеличением давления при фиксированном расстоянии между источником и детектором. При таком подходе возрастает частота столкновений между налетающими частицами и молекулами газа, что может привести к ошибке, если потери энергии зависят от этой частоты.

В настоящей работе измеряется энергия осколков деления после прохождения через газ (атмосферный воздух) при разном давлении. Эффект плотности может вносить вклад в энергетические потери осколков деления. Согласно теории Бете эти потери определяются квадратом ионного заряда, а в других теориях эта зависимость более сложна. Но при всех обстоятельствах при увеличении ионного заряда потери энергии возрастают. Измеряя потери энергии при разном давлении газа, можно наблюдать проявление этой зависимости, если эффект велик. В работах [2—4] эффект плотности при увеличении частоты столкновений приводит к возрастанию ионного заряда осколка более чем на 10%. В потерях энергии, пропорциональных квадрату ионного заряда, это должно приводить более чем к 20%-ному их росту при повышении давления в интервале от десятков до тысяч паскалей.

Цель эксперимента состояла в том, чтобы после исследования торможения осколков в газе при разном давлении оценить степень влияния эффекта плотности на энергетические потери. Давление газа лежит в интервале, в котором эффект плотности максимальный.

Схема эксперимента показана на рис. 1. В качестве источника осколков деления использовали ^{252}Cf на подложке из оксида алюминия, полученный путем самопереноса в вакууме. Его интенсивность ~ 900 дел./с. Держатели мишеней и детекторов позво-

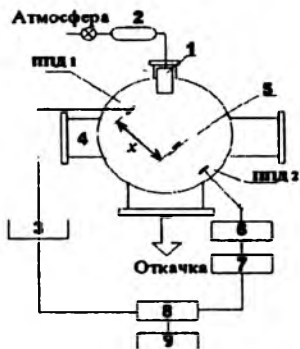
ляли менять расстояние от источника осколков деления до детекторов. Это расстояние отмечено на рис. 1 линией с двумя стрелками на концах.

Качество получаемых результатов будет существенно зависеть от точности измерения давления газа. Проблема измерения малого по сравнению с атмосферным давлением (от десятков до тысяч паскалей) решена следующим образом. Был измерен объем установки и к ней присоединен через вентиль малый известный объем. Установку сначала откачивали до высокого вакуума при закрытом вентиле, а затем в нее напускали газ из малого объема, давление в котором равно атмосферному. На основании закона Бойля—Мариотта легко рассчитать давление газа в установке после любого числа натеканий. По существу здесь мы имеем дело с получением давления газа с шагом, зависящим от числа натеканий, а не с измерением. Результаты расчета давления хорошо согласуются с показаниями образцового стрелочного вакуумметра. На получаемое давление влияло атмосферное, которое контролировали. В экспериментах оно составляло 99—100 кПа.

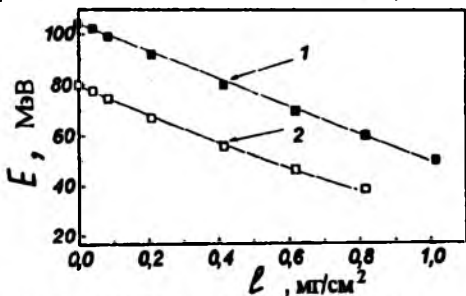
Эксперимент проводили сериями, в каждой из которых измеряли два амплитудных спектра осколков деления. Один набирали после прохождения осколками деления слоя вещества, второй — в вакууме, причем последний служил опорным спектром при обработке эксперимента — по нему определяли коэффициенты энергетической калибровки. Сдвиг спектра по отношению к опорному служил мерой потерь энергии для двух групп осколков. Одну и ту же толщину слоя вещества (в мг/см^2) выбирали при давлении газа 315 и 3150 Па, соответствующее им расстояние от источника до детектора было равно 175 и 17,5 мм. При изменении давления газа и расстояния в более широком диапазоне получена кинетическая энергия осколков давления, остающаяся после прохождения ими слоя вещества. Результаты приведены на рис. 2. Погрешности — в пределах экспериментальных точек.

В таблице представлены результаты серий экспериментов для двух значений давления тормозящего газа. Обработка результатов заключалась в вычислении средних значений и стандартных отклонений потерь энергии.

Потери энергии осколков деления



Р и с. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — эффузионная камера; 2 — вспомогательный баллон; 3, 6 — предохранители; 4 — корпус установки; 5 — источник осколков деления; 7 — линия задержки; 8 — схема совпадений; 9 — многоканальный анализатор



Р и с. 2. Потери энергии осколков деления в воздухе: 1 — средний легкий, 2 — средний тяжелый осколок; ■, □ — эксперимент; — — расчет по формулам (1) и (2)

Средний осколок	Потери энергии, МэВ								Средняя потеря энергии, МэВ	σ^2
$p = 3150 \text{ Па}, l = 17,5 \text{ мм}$										
Тяжелый	3,85	3,83	3,36	4,1	4,28	4,42	3,75	3,94	0,36	
Легкий	3,72	3,2	3,38	3,26	3,66	3,67	3,5	3,48	0,21	
$p = 315 \text{ Па}, l = 175 \text{ мм}$										
Тяжелый	3,95	3,82	4,06	3,42	3,64	4,03	3,48	3,77	0,38	
Легкий	3,47	3,51	3,52	3,2	3,09	3,68	3,04	3,35	0,42	

Средние значения потери энергии для двух групп осколков деления и двух значений плотности газа близки с погрешностью эксперимента около 10%.

Обсуждение результатов. Согласно современным представлениям в определенном интервале скорости потери энергии иона в среде пропорциональны квадрату его ионного заряда. Так, в формуле Бете, служащей основой расчета потерь энергии ионов до настоящего времени, эта пропорциональность получена из теоретических соображений [8]. При выводе формулы сделаны предположения, которые не строго выполняются для многозарядных ионов, аналогичных осколкам деления по своим физическим характеристикам. В частности, скорость ионов должна быть значительно больше скорости электронов, принадлежащих атомам среды.

Для ионов, движущихся со скоростью, значительно меньшей скорости электронов, принадлежащих атомам среды, существует теория Линдхарда [9—11], в которой зависимость потерь энергии от зарядов сталкивающихся партнеров сложная.

При расчете энергетических потерь осколков деления применение каждой из этих теорий затруднено, так как скорость ионов-осколков лежит в промежуточной области. Выход из создавшегося положения находят в модификации теорий, причем теория [9—11] для осколков деления используется редко [12, 13]. Гораздо чаще расчеты потерь энергии осколков проводят в рамках теории Бете. Однако ее применение связано с использованием разнообразных модельных эффективных зарядов, полученных в результате обработки экспериментальных данных о потере энергии. По своему физическому смыслу эффективный заряд — это параметр, который получен при подгонке теории Бете к эксперименту. Известно, что эффективные заряды близки к ионным зарядам многозарядных ионов в газе [1].

Согласно теории Бете потери энергии иона в среде с атомным номером A_m и зарядом ядра мишени Z_m описываются соотношением [7]

$$-\frac{dE}{dx} [\text{МэВ}/(\text{мг}/\text{см}^2)] = 3,072 \cdot 10^{-4} \left(\frac{Z_{\text{эф}}}{(v/c)} \right)^2 \left(\frac{Z_m}{A_m} \right) \ln \left(\frac{m_e v^2}{I} \right), \quad (1)$$

где $Z_{\text{эф}}$ — эффективный заряд; v — скорость иона; c — скорость света; Z_m , A_m — заряд ядра и атомная масса среды; m_e — масса электрона; I — средний потенциал ионизации мишени. Эффективный заряд наиболее часто записывается в виде [14]

$$Z_{\text{эф}} = Z \left[1 - A \exp \left(-B \frac{v}{v_0 Z^{2/3}} \right) \right], \quad (2)$$

где Z — заряд ядра иона; v_0 — скорость электрона на первой боровской орбите. Известны и более сложные выражения, учитывающие различные эффекты, происходящие при торможении ионов. Коэффициенты A и B , как правило, близкие к единице, подбираются так, чтобы наилучшим образом описывать экспериментальные данные.

Применимость теории Бете с эффективными зарядами, вычисленными по формуле (2), к описанию потерь энергии осколков деления в газе продемонстрирована на рис. 2, где результаты расчета получены при следующих коэффициентах: $A = 0,91$, $B = 0,75$ для среднего легкого и $A = 1,03$, $B = 1,0$ для среднего тяжелого осколка. Согласие между расчетом и экспериментом хорошее, поэтому есть основание предполагать, что потери энергии зависят от заряда квадратично.

Результаты эксперимента показывают, что степень влияния эффекта плотности в диапазоне от 300 до 8000 Па на потери энергии осколков деления не превышает 10%.

Расчет эффекта плотности. В работе [4] ионные заряды осколков деления изменены в физически более корректных условиях, чем в работе [2, 3]. Эксперименты [4] как частный случай включали в себя эксперименты [2, 3]. Осколки деления отклонялись магнитным полем. Результаты представлены на рис. 3. По оси ординат

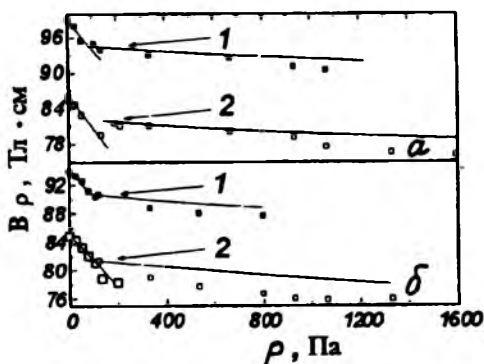
отложено произведение индукции магнитного поля B на радиус кривизны траектории осколков ρ в этом поле. Это произведение связано со скоростью иона, масса которого m , скорость v и ионный заряд q , соотношением $B\rho = m/(v/q)$. Видно, что при прямой пропорциональности между зарядом и скоростью, использовавшейся для объяснения результатов в работе [4], $B\rho$ должно быть величиной постоянной, определяемой отношением v/q , приобретенным осколком деления на начальном участке траектории. Уменьшение произведения $B\rho$ при возрастании давления объясняется авторами работы [4] ростом ионного заряда q . Покажем, что этот результат допускает и иную интерпретацию. В работе [4] осколки деления вылетали из уранового слоя, который расположен в торце герметичной трубы, помещенной в канал реактора, проходя расстояние около 5 м перед попаданием в магнитную отклоняющую систему. Давление увеличивали двояким образом. В одном случае всю трубу заполняли газом, в другом (при большом давлении) газом заполняли только щель в отклоняющей системе. В обоих случаях осколки деления теряют энергию, при этом уменьшается их скорость. Снижение скорости при задаваемой выпуклой функцией связи между ею и зарядом осколка для одного и того же давления приводит к уменьшению отношения v/q , которое будет вогнутой функцией, что может простым образом объяснить уменьшение произведения $B\rho$.

Нами проведен расчет $B\rho$ в эксперименте [4] с учетом потерь энергии. Для воздуха потери энергии и зависимость заряда от скорости представлены в настоящей работе, для аргона — взяты из работ [6, 7]. Известно, что осколки деления ^{235}U по своим массово-энергетическим характеристикам близки к осколкам деления ^{252}Cf . Технические данные магнитного спектрографа брали из работы [15]. Это был тот же спектрограф, что и в работе [4]. На компьютере моделировали траектории осколков деления при их торможении в трубе и отклоняющей системе. В первом случае при относительно малом давлении вычисляли отношение v/q , с которым осколки деления попадали в отклоняющую систему, и соответствующую величину $B\rho$. Во втором случае, когда газ с высокой плотностью заполнял только зазор в магнитной отклоняющей системе, траектория переставала быть дугой окружности из-за изменения этого отношения во время пролета осколков через отклоняющую систему. И величину $B\rho$ вычисляли по углу вылета осколков из магнитной системы.

Результаты расчета представлены на рис. 3. Видно, что эффект плотности объясняется без предположения об увеличении ионных зарядов при возрастании частоты столкновений.

Закключение. Проведенный нами расчет траекторий осколков деления, которые они проходили в эксперименте [4], показал, что эффект плотности сильно понижается при учете нелинейной зависимости между ионным зарядом и скоростью осколков в процессе их торможения. Расчет основывался на результатах измерений потерь энергии осколков деления в воздухе, сделанных в настоящей работе, и современных данных о потерях энергии в аргоне. Погрешность эксперимента, описанная в настоящей работе, близка к 10%. С той же степенью точности можно утверждать, что влияние эффекта плотности на потери энергии не проявляется в измеренном диапазоне давления от 300 до 8000 Па.

Работа выполнена при поддержке фонда РФФИ, проект № 96-02-17443а.



Р и с. 3. Эффект плотности в воздухе (а) и аргоне (б): 1 — средний тяжелый, 2 — средний легкий осколок; ■, □ — эксперимент [4], — — расчет авторов настоящей статьи

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Betz H. Charge states and charge-changing cross section of fast heavy ions penetrating through gaseous and solid media. — *Rew. Mod. Phys.*, 1972, v. 44, № 3, p. 465—539.
2. Lassen N. Total charges of fission fragments as function of the pressure of the stopping gas. — *Math.-fys. medd. Kgl. danske vid. selskab*, 1951, v. 26, № 12.
3. Lassen N. The total charges of fission fragments in gaseous and solid stopping media. — *Ibid.*, № 5.
4. Fulmer C., Cohen B. Equilibrium charges of fission fragments in gases. — *Phys. Rev.*, 1957, v. 109, № 1, p. 94—99.
5. Будник А.П., Кацуро О.Н., Соколов Ю.В. Описание тормозной способности инертных газов для осколков деления в классической теории бинарных столкновений: Препринт ФЭИ-2495, 1996. 20 с.
6. Govil R. e.a. Measurement of specific energy losses of individual fission fragments with back-to-back $\Delta E-E$ detector system. — *Nucl. Instrum. Meth.*, 1984, v. B4, № 1, p. 13—19.
7. Biswas D., Rao M., Choudhury R. Specific energy-loss behaviour of fission fragments along their range in P-10 gas. — *Ibid.*, 1991, v. B53, № 3, p. 251—254.
8. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Квантовая механика. М.: Наука, 1974.
9. Lindhard J., Scharff M. Notes on atomic collisions. — *Phys. Rev.*, 1961, v. 124, p. 128.
10. Lindhard J., Scharff M., Schiott H. Range concepts and heavy ion range. — *Math.-fys. medd. Kgl. danske vid. selskab*, 1963, v. 33, № 14.
11. Lindhard J., Nielsen V., Scharff M., Thomsen P. Integral equation governing radiation effects. — *Ibid.*, № 10.
12. Laichter Y., Geissel H., Shafir N. On the nuclear charge and atomic mass of attenuated mean fission fragments. — *Nucl. Instrum. Meth.*, 1982, v. 194, № 1—3, p. 45—50.
13. Batra R., Shottler A. Passage of fission fragments through thin film plastic scintillators. — *Ibid.*, 1984, v. B5, p. 14—19.
14. Brown M., Moak C. Stopping powers of some solids for 30—90 MeV ^{238}U ions. — *Phys. Rev. B*, 1972, v. 6, № 1, p. 90—94.
15. Cohen B., Cohen A., Coley C. Energy distribution of mass-97 fission fragments from thermal-neutron fission of Uranium-235. — *Phys. Rev.*, 1956, v. 104, № 4, p. 1046—1053.

Поступила в Редакцию 28.05.97

УДК 539.173

ЗАРЯДОВОЕ РАВНОВЕСИЕ ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ ПОСЛЕ ВЫЛЕТА ИЗ ТВЕРДОГО ТЕЛА В ГАЗ

Рыков В.А. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского)

При гетерогенной ядерной накачке газовых лазерно-активных сред осколки деления преодолевают границу раздела веществ, находящихся в разных агрегатных состояниях [1]. Исследование изменений, которые претерпевают при таком переходе ионные заряды осколков, представляет особый интерес, потому что именно они определяют характер процессов, происходящих в лазерно-активной среде. В процессе деления атомных ядер внутри слоя, представляющего собой твердую фазу, происходит разрушение электронных оболочек материнского атома. Часть электронов захватывается осколками, часть переходит в непрерывный спектр, и при этом формируется начальный ионный заряд осколков. Если деление произошло далеко от поверхности слоя, то при движении осколка к этой поверхности устанавливается зарядовое равновесие, характерное для твердого тела. Согласно современным представлениям средний ионный заряд и равновесное зарядовое распределение в дальнейшем будут определяться скоростью частицы. Причина такого равновесия состоит в конкуренции между захватом и потерей электронов, а время его установления намного меньше времени, в течение которого скорость иона существенно меняется. При попадании осколка деления в газовую среду устанавливается новое зарядовое равновесное распределение, причем средний ионный равновесный заряд может существенно измениться.

Н. Бор предложил простую формулу для среднего равновесного ионного заряда: