

## ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СТОЛКНОВЕНИЙ МАКРООБЪЕКТОВ НА ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОСТАВЛЯЮЩИХ ИХ ТЯЖЕЛЫХ НУКЛИДОВ

М.К. Марахтанов, В.С. Окунев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
e-mail: mkm@power.bmstu.ru; okunev@power.bmstu.ru

*Представлены результаты качественного анализа ядерно-физических процессов, которые могут быть вызваны инерциальным взрывом тяжелых металлов. Исследованы возможность существенного уменьшения периода полураспада атомных ядер в результате инерциального взрыва и потенциальная возможность последующих ядерных реакций, в том числе деления тяжелых нуклидов. Подтверждено мнение независимых экспертов, что применение боеприпасов с сердечником из обедненного урана может привести к радиоактивному загрязнению территории.*

**Ключевые слова:** инерциальный взрыв металлов, радиоактивный распад, период полураспада, деформированные ядра, ядерные реакции, устойчивость атомных ядер.

## INFLUENCE OF MECHANICAL COLLISION MACROOBJECTS ON NUCLEAR-PHYSICAL PROPERTIES OF COMPONENTS OF THEIR NUCLIDES

M.K. Marakhtanov, V.S. Okunev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation  
e-mail: mkm@power.bmstu.ru; okunev@power.bmstu.ru

*The study presents the results of the qualitative analysis of the elementary nuclear-physical processes that can be initiated by inertial explosion of heavy metals. We revealed the possibility of a substantial reduction in the half-life of atomic nuclei as a result of inertial explosion, and the potential for subsequent nuclear reactions, including the fission of heavy nuclei. We confirmed the opinion of independent experts that the use of ammunition with a projectile of the metal depleted uranium may lead to radioactive contamination of the territory.*

**Keywords:** inertial explosion of metals, radioactive decay, half-life, deformed nuclei, nuclear reactions, stability of atomic nuclei.

**Введение.** Новое физическое явление — инерциальный взрыв металлов, которое наблюдается при столкновении металлов, разогнанных до скорости взаимного сближения порядка 1000...1700 м/с, рассматривается в работах [1–4]. Это явление связано с полным или частичным срывом электронного облака при ударе металлического “снаряда” о металлическую преграду (“мишень”), с полным или частичным взаимным расталкиванием ионов в узлах кристаллической решетки за счет кулоновских сил [5]. Инерциальный взрыв реализуется, например, при столкновении снаряда, содержащего металлический

уран, с танковой броней или железобетоном, включая жилые дома и сооружения невоенного назначения.

По данным информагентств, в 2012 г. ВМС США испытали новую электромагнитную пушку. Мощность установки дает энергию 32 МДж, т.е. при столкновении с “мишенью” создается давление приблизительно до  $10^{11}$  атм. Скорость вылета снаряда 2,5 км/с, в боевой корабельной установке этот показатель составит 6 км/с. И это не предел. Согласно данным электронного издания “Свободная пресса”, в России разрабатывается электромагнитная пушка “Рельсотрон Арцимовича”. Рельсотроны (рельсовые ускорители масс) позволяют ускорять тела массой до 100 г до скоростей 6...10 км/с. В лабораторных испытаниях, проведенных в Шатурском филиале Объединенного института высоких температур РАН (ОИВТ РАН), максимальная скорость снаряда массой около 3 г достигла 6,25 км/с.

По мнению ряда независимых экспертов, использование странами НАТО бронебойных боеприпасов с сердечниками из металлического сплава обедненного урана во время войн в Ираке и Югославии привело к радиоактивному загрязнению местности с последующей вспышкой онкологических заболеваний. Другие эксперты (Пентагон, НАТО, власти США и Великобритании) утверждают, что это невозможно. Авторы настоящей статьи попытались проанализировать, возможно ли заметное изменение ядерно-физических свойств нуклидов, в частности, уменьшение периода полураспада обедненного урана, при столкновении снаряда с преградой.

**От алхимии к актуальным ядерно-физическим задачам современности.** Попытки средневековых ученых-алхимиков превращать химические элементы за счет “качественных изменений внутри предмета, его перерождения и перехода на новый уровень” не увенчались успехом. В распоряжении алхимиков были сосуды, не обладающие высокой прочностью, и огонь, с помощью которого можно было создать относительно невысокие температуры и давление, не позволяющие сблизиться атомным ядрам на расстояние действия ядерных сил (менее 10 фм). В результате реализовать ядерные реакции не представлялось возможным. Невозможно было повлиять и на периоды полураспада атомных ядер.

Развитие физики в XX в. реализовало желание алхимиков превращать элементы, но за счет сил ядерного взаимодействия. Не зная о ядерном взаимодействии и проводя химические опыты (в основе которых — электромагнитное взаимодействие, поскольку химическая связь определяется взаимодействием между электрически заряженными частицами: атомными ядрами и электронами), алхимики не добились успеха. Справедливости ради отметим, что ядерные реакции

могут быть инициированы переносчиками электромагнитного взаимодействия —  $\gamma$ -квантами, не участвующими в ядерном взаимодействии. В 1934 г. Дж. Чедвиком и М. Гольдхабером был открыт ядерный фотозффект [6]. Позднее (1950 г.) было экспериментально обнаружено фотоделение [7]. Главное условие реализации ядерных реакций, протекающих с образованием составного ядра, — перевод исходного ядра в возбужденное состояние, причем не важно, каким способом.

Попытаемся ответить на два вопроса. Могут ли столкновения макрообъектов привести к заметному (на порядки) изменению периода полураспада атомных ядер? При каких условиях ядра атомов, из которых состоят быстро сталкивающиеся макрообъекты, могут вступить в ядерное взаимодействие, другими словами, возможно ли, чтобы расстояние между этими ядрами сократилось до 2... 10 фм (в классической мезонной теории Юкавы 1,4 фм)?

**О возможности влияния механических столкновений макрообъектов на период полураспада составляющих их нуклидов.** Довольно много работ посвящено изучению возможности изменения скорости распада атомных ядер. Первые попытки повлиять на период полураспада радиоактивных элементов были предприняты сразу после открытия радиоактивности [8]. Исследовалось влияние температуры, давления, концентрации, возраста, внешних полей, химического состояния и внешней среды на скорость распада. Однако ни в одном из этих случаев не удалось достоверно констатировать изменение периода полураспада. Более 60 лет назад<sup>1</sup> было указано, что изменение химического состава атома может привести к заметному изменению вероятности ядерного перехода [9]. В связи с относительной доступностью создания интенсивных электромагнитных полей проще всего влиять этими внешними полями на скорость  $\beta$ -превращений атомных ядер.

В экспериментах, проводимых с 2003 г. специалистами Сибирского химического комбината (Северск), регистрировалось ускорение  $\beta$ -распадов при изменении состояния электронной оболочки атомов радиоактивных элементов, а также периодические изменения скорости  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадов за счет тепловых эффектов [10]. Экспериментальные результаты контролируемого изменения скорости радиоактивного распада атомных ядер получены к 2008 г. специалистами ОИЯЭ (Дубна) [11]. Для полония  $^{212}\text{Po}$ , имплантированного в металлический свинец природного изотопного состава, было зарегистрировано увеличение скорости распада на 0,2% по сравнению со скоростью распада полония  $^{212}\text{Po}$  в никеле [11].

<sup>1</sup>В 1947 г. (прим. авторов).

Ядро защищено от внешних воздействий электронной оболочкой атома. В результате постоянная распада  $\lambda$  не зависит от внешних условий (температуры, давления, магнитного поля, химического состава вещества). Если эта защита несовершенна, постоянные распада могут различаться в зависимости от условий опыта. Например, в составе молекул часть электронов одного атома отдана другому, что приводит к изменению электрического поля вблизи ядра. Следовательно, постоянная распада ядра свободного атома может отличаться от постоянной распада атома в составе молекулы. Влияние изменения давления  $P$  на постоянную распада характеризуется соотношением [7]

$$\Delta\lambda/\lambda \sim P. \quad (1)$$

Таким образом, полная или частичная потеря атомных электронов, предшествующая инерциальному взрыву металлов [1], и аномально высокое давление при столкновении металлов [12] должны способствовать уменьшению периода полураспада атомных ядер. Столкновение снаряда, содержащего обедненный уран и разогнанного до большой скорости, с танковой броней или железобетоном, должно привести к уменьшению периода полураспада урана. В результате может произойти радиоактивное загрязнение местности.

Для нейтронно-физических расчетов различных систем (в том числе ядерных реакторов) используют библиотеки (файлы) оцененных ядерных данных. Эти библиотеки содержат данные по ядерно-физическим свойствам нуклидов, в том числе по радиоактивным распадам, характеристикам ядерных реакций. Для удобства использования информации МАГАТЭ рекомендует единый стандарт представления данных: ENDF/B. Под эгидой МАГАТЭ функционируют четыре центра ядерных данных: Nuclear Data Section (Вена); OECD NEA Data Bank (Париж), включая японский National Data Centre of JAERI; Брукхэвенские центры (США и Канада); Российский центр (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского, Обнинск).

Обратимся к современной версии файлов оцененных ядерных данных ENDF/B-VII.1 Лос-Аламосской национальной лаборатории США [13]. Как правило, обедненный металлический уран содержит 0,44 %  $^{235}\text{U}$  и 99,56 %  $^{238}\text{U}$  (вес.). Периоды полураспада этих изотопов урана по отношению к  $\alpha$ -распаду составляют  $7,04 \cdot 10^8$  и  $4,47 \cdot 10^9$  лет соответственно, по отношению к спонтанному делению —  $1,9 \cdot 10^{17}$  и  $5,9 \cdot 10^{15}$  лет [9]. Вероятность распада изотопа урана  $^{235}\text{U}$  по каналу с испусканием  $\alpha$ -частиц почти 100 %, спонтанного деления  $7,2 \cdot 10^{-9}$  %. Находясь в первом метастабильном состоянии (на первом возбужденном уровне) изотоп  $^{235m1}\text{U}$  с вероятностью 100 % испускает  $\gamma$ -кванты (период полураспада 26,00 мин). Спин  $^{235}\text{U}$  3,5; спин  $^{235m1}\text{U}$

равен нулю, т.е. в возбужденном энергетическом состоянии ядро урана оказывается менее деформированным, чем в основном. Вероятность спонтанного деления изотопа  $^{238}\text{U}$   $5,46 \cdot 10^{-5} \%$ .

Если вероятность спонтанного деления изотопов урана, находящихся в основном энергетическом состоянии, пренебрежимо мала, то основной источник появления относительно короткоживущих нуклидов при инерциальном взрыве металлов, — это  $\alpha$ -распад. Однако гораздо бóльшую опасность представляет значительное (на много порядков) уменьшение периода полураспада по отношению к спонтанному делению изотопов урана. Закона (1) для этого явно недостаточно: вряд ли в современных рельсотронах возможно увеличить давление при столкновении металлов на 14–16 порядков. Есть ли другие способы?

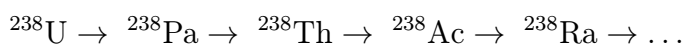
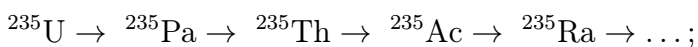
В 1962 г. Г.Н. Флеровым, С.М. Поликановым и их коллегами из ОИЯИ было обнаружено следующее: ядра урана и трансурановых элементов могут делиться спонтанно с двумя отличающимися друг от друга периодами полураспада ([14], а также ссылки к этой работе), например, для изотопа  $^{238}\text{U}$   $5,9 \cdot 10^{15}$  лет и  $0,3 \cdot 10^{-6}$  с. Наличие двух значений периода полураспада, т.е. двух вероятностей одного и того же типа распада, свидетельствует о том, что данный распад происходит из двух устойчивых состояний системы: основного (период полураспада около  $10^{16}$  лет) и изомерного ( $0,3 \cdot 10^{-6}$  с). Так была открыта делительная изомерия — спонтанное деление изотопов урана, плутония, америция, кюрия и берклия, находящихся в возбужденном состоянии с энергией возбуждения около 2... 3 МэВ.

Ядра с магическими числами нейтронов и протонов имеют аномально большую энергию связи (в том числе последнего нейтрона и протона) и нулевой собственный (внутренний) квадрупольный электрический момент (дважды магические ядра сферически симметричны). Ядра, характеризующиеся максимальным квадрупольным электрическим моментом ( $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ), максимально деформированы по отношению к сферической форме (вытянуты). Сильно деформированные ядра проявляют свойства дважды магических ядер: обладают повышенной устойчивостью к радиоактивным распадам и ядерным реакциям [15–19]. Перевод этих ядер из основного энергетического состояния в возбужденное изменяет форму ядра по сравнению с исходной (наиболее устойчивой) и значения собственного квадрупольного электрического момента, в результате чего снижает устойчивость ядра (период полураспада). Любая деформация ядра по отношению к наиболее устойчивому состоянию, независимо от причин, вызвавших такую деформацию, ведет к уменьшению периода полураспада. Вероятность разных каналов радиоактивного распада определяется вну-

тренней структурой ядра и его энергетическими уровнями. Деформирование ядра разрушает оболочечную структуру и изменяет расположение уровней.

Можно ли деформировать ядро урана механическим воздействием и перевести его в возбужденное состояние или по крайней мере создать условия, подобные переходу в возбужденное состояние? Вряд ли удастся непосредственно механическим воздействием (характерная энергия металлической связи 3...8 эВ) перевести ядро в состояние с энергией возбуждения 2...3 МэВ, но деформировать сильно вытянутые ядра воздействием аномально высокого давления (до  $\sim 10^{11}$  атм.) вполне возможно, если не за счет ядерного (радиус действия ядерных сил крайне мал), то за счет электромагнитного (взаимного кулоновского расталкивания протонов) или слабого (захвата атомных электронов протонами ядра, если не все электроны покинули область инерциального взрыва) взаимодействий. Интенсивность слабого взаимодействия мала, но вероятность электронного захвата при аномально высоких давлениях, когда атомные электроны приближаются к ядру или даже находятся внутри ядра, резко возрастает. Кроме того, приближение электронов к ядру снижает кулоновский барьер, препятствующий испусканию ядром положительно заряженных фрагментов (протонов,  $\alpha$ -частиц, других легких ядер, осколков деления), в результате чего среднее время жизни атомного ядра уменьшается [7].

Последовательные электронные захваты приводят к увеличению отношения числа нейтронов ( $N$ ) и протонов ( $Z$ ) в ядре и заметному отдалению нуклида от области оптимального соотношения нейтронов и протонов, соответствующего электроядерному равновесию (равновесию сил ядерного, электромагнитного и слабого взаимодействий). Изотоп  $^{235}\text{U}$  имеет нечетное число нейтронов и четное число протонов. Однако он характеризуется оптимальным отношением  $N/Z$ , и в связи с этим период полураспада изотопа  $^{235}\text{U}$  велик. Нуклид  $^{238}\text{U}$  имеет четные числа  $N$  и  $Z$ , максимально деформирован (значение  $Z = 92$  соответствует одному из локальных максимумов собственного квадрупольного электрического момента ядра) и, следовательно, является самым долгоживущим изотопом урана, несмотря на неоптимальное отношение  $N/Z$  (перегружен тремя нейтронами) [13]. После захвата электрона (любого, не обязательно своего атома) ядра  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  трансмутируются в  $\beta^-$ -активные  $^{235}\text{Pa}$  и  $^{238}\text{Pa}$ . По мере захвата электронов реализуются следующие переходы:



Все нуклиды этих цепочек, кроме урана, в 100 % случаев распадаются по каналу  $\beta^-$  за несколько минут (таблица), в результате чего ядра трансмутируют в нуклиды в обратном направлении цепочки, т.е.  $^{235}\text{Ra} \rightarrow ^{235}\text{Ac}$  и т.д. Все распады сопровождаются  $\gamma$ -излучением.

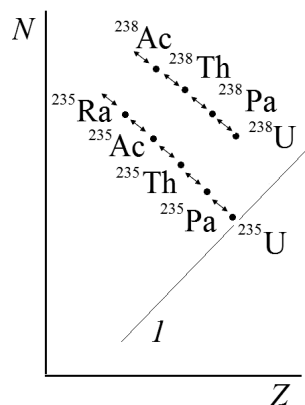
Характеристики распадов некоторых атомных ядер [9]

Нуклид	Период полураспада, мин	Энергия сопутствующего $\gamma$ -излучения, МэВ
$^{235}\text{Ra}$	24,44	0,47
$^{235}\text{Th}$	7,10	0,05
$^{235}\text{Ac}$	1,00	1,16
$^{238}\text{Ra}$	2,27	1,15
$^{238}\text{Th}$	9,40	0,62

Последовательные захваты электронов постепенно переводят тяжелые нуклиды в область неустойчивых нейтронно-избыточных ядер (рисунок), последовательные  $\beta^-$ -распады переводят ядра в область максимально долгоживущих ядер-изобар этих цепочек превращений:  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ . Получается некоторое подобие “вечного двигателя”, но подобие кажущееся: если электронные захваты вызваны аномально высоким давлением и, по своей сути, есть обращения природных (условно необратимых) процессов, то обратные процессы ( $\beta^-$ -распады) не требуют внешних воздействий. Первые процессы — маловероятны: их реализация зависит от наличия электронов в кристаллической структуре металла или на орбите атомов и давления в момент, предшествующий инерциальному взрыву металлов. Вторые протекают с вероятностью 100 % и сопровождаются испусканием  $\gamma$ -квантов также в 100 % случаев. Энергии этого  $\gamma$ -излучения недостаточно, чтобы инициировать фотоядерные реакции, включая фотоделение. Сечение взаимодействия  $\gamma$ -квантов такой энергии с электронными оболочками атома намного выше сечения взаимодействия с ядрами. Например, в ядерных реакторах на 1000 делений изотопа  $^{235}\text{U}$  нейтронами происходит одно деление  $\gamma$ -квантом с энергией около 1 МэВ [7]. Однако при

**Расположение нуклидов цепочек  $\beta$ -превращений урана  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  на диаграмме  $Z - N$ :**

$I$  — кривая электроядерного равновесия; точки соответствуют нуклидам; стрелками показаны переходы нуклидов в результате  $\beta$ -превращений



отсутствии электронов на орбите атома вероятность взаимодействия  $\gamma$ -излучения с ядрами значительно возрастает. Известно, что в  $1 \text{ см}^3$  металлического урана содержится  $4,73 \cdot 10^{22}$  атомных ядер. Бронебойные сердечники изготавливают спеканием мелкодисперсного порошка металлического урана плотностью несколько большей ( $19,03 \text{ г/см}^3$ ), чем обычно приводят в справочниках ( $18,46 \dots 18,75 \text{ г/см}^3$ ). Ядерная плотность такого урана на  $1,5 \dots 3,0\%$  выше справочных значений. Последовательный захват  $\gamma$ -квантов ядрами урана  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  ведет к образованию составного ядра — того же ядра урана, но в возбужденном состоянии. Как было отмечено ранее, при энергии возбуждения  $2 \dots 3 \text{ МэВ}$  возможно спонтанное деление урана с периодом полураспада  $0,3 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ , а при энергии около  $6 \text{ МэВ}$  — распад составного ядра по каналу деления за  $1,1 \cdot 10^{-14} \text{ с}$  [7].

Если аномально высокое давление будет создано механическим способом, например, столкновением макроскопического объекта — уранового снаряда с другим макроскопическим объектом — мишенью, то возможна деформация сильно вытянутого ядра урана. Любая деформация ядра ведет к уменьшению периода полураспада. Однако перевод ядра в возбужденное состояние также связан с деформацией формы ядра по сравнению с наиболее устойчивой — исходной. В этом смысле эффект столкновения макрообъектов полностью эквивалентен переводу нуклидов, из которых состоят эти макрообъекты, в возбужденные состояния. Чем больше отклонение формы ядра от исходной (и собственного квадрупольного электрического момента от исходного максимального значения для изначально деформированных ядер урана), тем меньше период полураспада. Таким образом, сильная деформация ядра урана любым из возможных способов, включая столкновение макрообъектов, ведет к уменьшению периода полураспада даже при сохранении электронного облака, окружающего атомное ядро. (Еще раз сравним периоды полураспада по отношению к спонтанному делению урана:  $10^{16}$  лет и  $0,3 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ ). Если электронное облако полностью или частично потеряно (при механическом воздействии), то период полураспада становится еще меньшим. В этом случае наблюдаются сразу две причины, снижающие период полураспада: деформация ядра по отношению к наиболее устойчивому состоянию и аномально высокое давление (1).

**Ядерные реакции, инициированные механическими столкновениями макрообъектов.** Нагрев до высоких температур, использование ускорительной техники, возможность создания высокого давления легко позволяют сблизить взаимодействующие частицы (из числа адронов) и (или) ядра до расстояния действия ядерных сил, и тем самым реализовать ядерную реакцию. Так, в современных установках



инерциального (лазерного) синтеза минимальное давление на поверхности сферической мишени  $5 \cdot 10^9$  атм. и может достигать  $10^{12}$  атм. [7]. Такое давление позволяет сблизиться ядрам дейтерия и трития на расстояние действия ядерных сил. При этом не имеет значения, каким образом создано такое давление.

Если аномально высокое давление будет создано механическим способом, например, столкновением макроскопического объекта (уранового снаряда или снаряда, изготовленного из другого материала) с другим макроскопическим объектом (мишенью), то возможно ли ядерное взаимодействие тяжелых нуклидов, входящих в состав снаряда и мишени? Среди подобных взаимодействий тяжелых ядер различают неупругое рассеяние, касательные взаимодействия (обмен нуклонами), глубоко неупругие передачи (обмен десятками нуклонов), слияние ядер с последующим распадом по многим каналам [9]. Если подобные процессы смогут быть реализованы, то радиационного загрязнения местности не избежать.

Для реализации ядерных реакций между атомным ядром и частицей (или другим ядром) необходимо сблизить эти два объекта на расстояние действия ядерных сил (до 10 фм). Такому сближению препятствует кулоновский барьер. Для средних и тяжелых ядер высоту кулоновского барьера  $U_k$  (МэВ) можно оценить с помощью полуэмпирического соотношения [7]:  $U_k \approx 1,2Z_a Z_X / \sqrt[3]{A}$ , где  $Z_a$  и  $Z_X$  — электрические заряды частицы и ядра, определенные в единицах заряда электрона;  $A$  — сумма массовых чисел ядра и частицы. Таким образом, если столкновению ядер дейтерия и трития препятствует кулоновский барьер  $U_k \approx 0,1$  МэВ [7], то при столкновении двух ядер  $^{238}\text{U}$  кулоновский барьер составляет 1,3 ГэВ. Преодолеть его механическим столкновением макрообъектов при современном развитии электромагнитных пушек вряд ли возможно. (Очевидно, тяжелый металл — неплохая защита танковой брони). Итак, ядерное взаимодействие двух тяжелых нуклидов практически исключено. Однако ядерные реакции могут быть вызваны не механическим столкновением макрообъектов, а его последствиями. Спонтанное деление изотопов урана приводит не только к радиоактивному загрязнению, но и к рождению нейтронов, способных инициировать деление и изотопа  $^{235}\text{U}$  (небольшое количество которого всегда содержится в обедненном уране), и изотопа  $^{238}\text{U}$ , что еще больше загрязняет окружающую среду. Зная сечения взаимодействия нейтронов с азотом и кислородом [9], можно оценить среднюю длину свободного пробега нейтрона, характеризующегося кинетической энергией 2 МэВ (средняя энергия нейтронов, образующихся при делении ядер урана), в воздухе до поглощения. В абсолютно сухом атмосферном воздухе она составляет приблизительно 10 км, т.е. любой

нейтрон, возникший при спонтанном делении урана, способен долететь до любого ядра урана (“обросшего” к тому времени электронным облаком и ставшего электрически нейтральным атомом), отброшенного сколь угодно далеко инерциальным взрывом металла. Вследствие отсутствия электрического заряда (и кулоновского барьера) нейтрон способен приблизиться к этому ядру на расстояние действия ядерных сил и инициировать ядерную реакцию, в том числе деления. При повышенной влажности воздуха упругое замедление на ядрах легкого водорода, входящего в состав воды, с одной стороны, препятствует делению изотопов  $^{238}\text{U}$  (изотоп  $^{238}\text{U}$  делится нейтронами с кинетической энергией более 1,4 МэВ), с другой, — значительно увеличивает сечение деления изотопа  $^{235}\text{U}$  (в идеале, в 450 раз при замедлении нейтронов до тепловой энергии).

Вытянутая форма ядер изотопов урана приводит к тому, что ядерные реакции реализуются даже при нецентральных столкновениях. Например, значение центробежного барьера (МэВ) при столкновении нейтрона с ядром урана  $^{235}\text{U}$  можно определить с помощью соотношения  $U_{\text{ц}} \approx 0,321l(l+1)$ , где  $l$  — орбитальное квантовое число [8]. Даже при сильно нецентральном столкновении ( $l = 5$ ) значение  $U_{\text{ц}} \approx 1,926$  МэВ, что ниже средней энергии рождения нейтронов при делении изотопа  $^{235}\text{U}$  (1,98 МэВ).

Принципиально возможно деление тяжелых ядер непосредственно при инерциальном взрыве металлического урана, в моменты не только следующие за ним, но и предшествующие ему.

**Оценка активности при использовании снарядов с сердечником из обедненного урана.** Попытаемся оценить характеристики радиоактивного загрязнения местности при использовании снарядов с урановым сердечником. Во время обстрелов Косова армией НАТО были использованы снаряды массой около 75 г. Активность источника, определяемая как произведение постоянной распада и концентрации ядер, при высоких периодах полураспада, которые характерны для основных изотопов, содержащихся в природном и обедненном уране, пренебрежимо мала: около  $2,31 \cdot 10^5$  Бк (по отношению к  $\alpha$ -распадам). При изготовлении сердечника из мелкодисперсного порошка урана она увеличивается незначительно и составляет  $(2,34 \dots 2,38) \cdot 10^5$  Бк в зависимости от плотности сердечника. Увеличение давления без перевода ядер в возбужденное состояние до значений, характерных для столкновения боезаряда с танковой броней, может увеличить постоянную распада и соответственно активность приблизительно на 10 порядков. И это не предел. При переводе ядер урана в возбужденное энергетическое состояние вследствие столкновения макрообъектов на больших скоростях, период полураспада уменьшается до  $0,3 \cdot 10^{-6}$  с (но уже по

отношению к спонтанному делению), активность источника может увеличиться до аномально высоких значений: около  $1,13 \cdot 10^{29}$  Бк.

При нагреве и повышении давления в результате столкновения сердечника из обедненного урана с танковой броней до 70 % массы урана испаряется с образованием оксидов урана. Эти оксиды токсичны и радиоактивны и в виде аэрозолей могут быть унесены ветром на расстояние 40 км от места взрыва, но обычно оседают в радиусе 150 м. Таким образом, при равномерном оседании оксидов урана на траву высотой 20 см в радиусе 150 м от эпицентра взрыва происходит радиоактивное загрязнение местности, характеризующееся удельной активностью  $3,03 \cdot 10^5$  Бк/см<sup>3</sup>, если ядра урана останутся в основном энергетическом состоянии и активностью  $1,44 \cdot 10^{19}$  Бк/см<sup>3</sup>, если все ядра урана перейдут в возбужденное состояние. Отходы ядерной энергетики, характеризующиеся удельной активностью  $(1,11 \dots 3,7) \cdot 10^6$  Бк/см<sup>3</sup> относят к среднеактивным, а отходы с активностью более  $3,7 \cdot 10^6$  Бк/см<sup>3</sup> — к высокоактивным [20]. Оценки выполнены без учета ядерных реакций (в том числе вынужденного деления) под действием нейтронов спонтанного деления обедненного урана. В этом случае активность значительно возрастет.

При делении ядер урана образуются мгновенные нейтроны с кинетической энергией в среднем около 2 МэВ, что при нормальных условиях соответствует скорости  $2 \cdot 10^7$  м/с, средняя кинетическая энергия запаздывающих нейтронов в 4 раза ниже, а их скорость в 2 раза меньше значений этих же параметров при нормальных условиях. При высокой влажности воздуха вследствие упругого замедления нейтронов, главным образом, на ядрах водорода, скорость нейтронов может уменьшиться на два-три порядка. Так, характерная кинетическая энергия теплового нейтрона (находящегося в термодинамическом равновесии с ядрами (атомами) среды), составляет 0,0253 эВ, а скорость — около  $2,2 \cdot 10^3$  м/с [7]. Время жизни запаздывающих нейтронов  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  0,3... 80,2 с, их относительная доля при делении изотопов урана  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  0,68 и 1,61 % [7]. Продукты взрыва при столкновении снаряда с броней разлетаются медленнее, чем образующиеся нейтроны. Следовательно, с ядрами урана, входящими в состав аэрозолей, могут взаимодействовать, главным образом, запаздывающие нейтроны. Это характерно при использовании всего одного уранового снаряда. Если происходит не один, а несколько последовательных выстрелов, то и мгновенные, и запаздывающие нейтроны могут взаимодействовать с ядрами урана, находящимися в составе аэрозолей (в том числе осевших на любой поверхности), от предыдущих взрывов.

Приведенные выше оценки характеризуют использование одного снаряда массой 75 г. Во время обстрелов Косова было использовано 31 тыс. боезарядов с сердечником из обедненного урана. Таким

образом, массу обедненного урана можно оценить в 2 325 кг, что соответствует 10,23 кг делящегося нейтронами сколь угодно малой кинетической энергии изотопа  $^{235}\text{U}$  при его содержании 0,44 % (вес.) в обедненном уране. В ходе операции “Буря в пустыне” в 1990–1991 гг. на территории Ирака было использовано 320 т боезарядов с сердечником из обедненного урана или около 1,4 т  $^{235}\text{U}$ .

**Заключение.** Инерциальный взрыв металлов при их столкновении может привести к существенному (на порядки) уменьшению их периодов полураспада. Если в качестве одного из металлов используется уран, то не исключены, хотя и менее вероятны, ядерные реакции, сопровождающие инерциальный взрыв. Деление тяжелых ядер возможно непосредственно при инерциальном взрыве металлического урана, в моменты, следующие за ним и предшествующие ему. Вероятность таких процессов невелика, однако ситуация усугубляется высокой ядерной плотностью урана, наличием изотопа  $^{235}\text{U}$  в составе обедненного урана, ускорением процессов радиоактивного распада, появлением продуктов, которые также способны вызвать деление. При этом исключено лишь ядерное взаимодействие тяжелых нуклидов между собой, инициирующее обмен нуклонами или слияние этих ядер с последующим распадом.

Образование тех или иных радиоактивных нуклидов в месте применения снарядов с урановым сердечником вполне предсказуемо: это продукты  $\alpha$ -распада и, в гораздо меньшей степени, спонтанного деления изотопов урана, продукты  $\beta$ -превращений тяжелых нейтронно-избыточных ядер-изобар по отношению к изотопам  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  (см. рисунок),  $\beta$ -превращения  $^{235m1}\text{U}$ , деления изотопов  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ . Все перечисленные процессы сопровождаются  $\gamma$ -излучением с энергией до 1,2 МэВ.

Выводы независимых экспертов о возможности серьезного радиоактивного загрязнения местности, где странами НАТО применялись бронебойные боеприпасы с сердечниками из металлического обедненного урана, вполне обоснованы. Они согласуются с качественным анализом физических процессов, протекающих при инерциальном взрыве урана.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Марахтанов М.К., Марахтанов А.М.* Квантовая макроэлектроника: События макромира, объясняемые законами квантовой механики. Опыт и теория. М.: КРАСАНД. 2014. 776 с.
2. *Марахтанов М.К.* Способ получения энергии из металлических материалов. Пат. № 2260779. RU, G01 L5/14, F42 B 12/02 с приоритетом от 14.05.2004. 20 сентября 2005 г. Б.И. № 26. 2005.

3. *Марахтанов М.К.* Металл как источник энергии // Изв. РАН. Энергетика. 2009. № 1. С. 79–91.
4. *Результаты* взаимодействия металлических снарядов со стальной мишенью / М.К. Марахтанов, В.А. Велданов, Д.В. Духопельников, А.С. Карнейчик, М.А. Максимов // Известия РАН. 2013. Вып. 2 (77). С. 105–112.
5. *Кулоновский* взрыв тонкой проволоки / Д.В. Духопельников, Н.П. Калашников, А.М. Марахтанов, М.К. Марахтанов, А.С. Ольчак // Ядерная физика и инжиниринг. 2010. Т. 1. Вып. 4. С. 339–346.
6. *Чадвик Дж., Гольдгабер М.* Ядерный фотоэффект (разложение дейтона  $\gamma$ -лучами) // УФН. 1934. Т. 14. Вып. 8. С. 953–956.  
DOI: 10.3367/UFNr.0014.193408b.0953
7. *Окунев В.С.* Основы прикладной ядерной физики и введение в физику ядерных реакторов. Сер. Физика в техническом университете. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 536 с.
8. *Кюри М.* Радиоактивность / пер. с фр. М.; Л.: ОГИЗ. 1947.
9. *Окунь Л.Б.* Влияние химического состояния на время жизни радиоактивного атома // УФН. 1954. Т. 52. Вып. 1. С. 161–163.  
URL: <http://ufn.ru/ru/articles/1954/1/e> DOI: 10.3367/UFNr.0052.195401e.0161
10. *Шадрин В.Н.* О возможности и способах влияния на скорость распада радиоактивных элементов. 2009. 23 с. URL: <http://tac.tomsk.ru/files/shad1.doc>
11. *Михеев В.Л., Морозов В.А., Морозова Н.В.* О возможности контролируемого изменения скорости радиоактивного распада атомных ядер // Письма в журнал “Физика элементарных частиц и атомного ядра”. 2008. Т. 5. № 4 (146). С. 623–627.
12. *Физика взрыва* / под ред. Л.П. Орленко. В 2 т. Т. 1. М.: Физматлит, 2004. 832 с.
13. *ENDF/B-VII.1.* LANL. USA. 2014. URL: <https://t2.lanl.gov/nis/data/endl/> (дата обращения: 24.04.2015).
14. *Поликанов С.М.* Спонтанно делящиеся изомеры // УФН. 1968. Т. 94. Вып. 1. С. 43–62. URL: <http://ufn.ru/ru/articles/1968/1/b/>  
DOI: 10.1070/PU1968v011n01ABEN003722
15. *Окунев В.С.* Исследование устойчивости магических, околомагических и деформированных атомных ядер // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2013. № 4. С. 34–55.
16. *Окунев В.С.* Особенности ядерно-физических свойств сверхтяжелых нуклидов // Научная сессия НИЯУ МИФИ–2015. Аннотации докладов. В 3 т. Т. 1. Фундаментальные исследования и физика частиц. Атомная энергетика и ядерные технологии. Ядерные системы и материалы. Физика неравновесных атомных систем и композитов. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. С. 130.
17. *Окунев В.С.* Некоторые закономерности в свойствах атомных ядер // Научная сессия НИЯУ МИФИ–2014. Аннотации докладов. В 3 т. Т. 1. Фундаментальные исследования и физика частиц. Ядерные технологии. Проблемы физического материаловедения. Композиты. Ядерная медицина. М.: НИЯУ МИФИ, 2014. С. 127.
18. *Окунев В.С.* Значимость факторов стабилизации атомных ядер // Научная сессия НИЯУ МИФИ–2014. Аннотации докладов. В 3 т. Т. 1. Фундаментальные исследования и физика частиц. Ядерные технологии. Проблемы физического материаловедения. Композиты. Ядерная медицина. М.: НИЯУ МИФИ, 2014. С. 127.
19. *Окунев В.С.* Исследование эффектов стабилизации и влияния перегруженности протонами на ядерно-физические свойства тяжелых нуклидов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2011. № 4. С. 81–98.
20. *Справочник по ядерной энерготехнологии* / Ф. Ран, А. Адамантиадес, Дж. Кентон, Ч. Браун; пер. с англ.; под ред. В.А. Легасова. М.: Энергоатомиздат, 1989. С. 483.

## REFERENCES

- [1] Marakhtanov M.K., Marakhtanov A.M. Kvantovaya makroelektronika: Sobytiya makromira, ob"yasnyayemye zakonami kvantovoy mekhaniki. Opyt i teoriya [Quantum Macroelectronics: Macrocosm Events, Explained by the Laws of Quantum Mechanics. Experiments and Theory]. Moscow, KRASAND Publ., 2014. 776 p.
- [2] Marakhtanov M.K. Sposob polucheniya energii iz metallicheskiykh materialov [The Method of Obtaining Energy from Metallic Materials]. Pat. no. 2260779. RU. 20.09.2005.
- [3] Marakhtanov M.K. Metal as an energy source. *Izv. RAN. Energetika* [Proc. of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 2009, no. 1, pp. 79–91 (in Russ.).
- [4] Marakhtanov M.K., Veldanov V.A., Dukhopelnikov D.V., Karneychik A.S., Maximov M.A. Results of metal shells interaction with a steel target. *Izvestiya RARAN* [Proceedings of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences], 2013, iss. 2 (77), pp. 105–112 (in Russ.).
- [5] Dukhopelnikov D.V., Kalashnikov N.P., Marakhtanov A.M., Marakhtanov M.K., Olchak A.S. Coulomb Explosion of a Thin Wire. *Yadernaya fizika i inzhiniring* [Nuclear Physics and Engineering], 2010, vol. 1, iss. 4, pp. 339–346 (in Russ.).
- [6] Chadwick J., Goldhaber M. A Nuclear Photo-effect: Disintegration of the Diplon by Rays. *Nature*, 1934, vol. 134. pp. 237–238.
- [7] Okunev V.S. Osnovy prikladnoy yadernoy fiziki i vvedenie v fiziku yadernykh reaktorov. Ser. Fizika v tekhnicheskoy universitete [Fundamentals of Applied Nuclear Physics and Introduction to the Physics of Nuclear Reactors]. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana Publ., 2015. 536 p.
- [8] Curie M., Curie P. Radioactivite. 1935.
- [9] Okun' L.B. The Effect of a Chemical State on the Radioactive Atom Lifetime. *Usp. Fiz. Nauk* [Physics-Uspekhi], 1954, vol. 52, iss. 1, pp. 161–163 (in Russ.). URL: <http://ufn.ru/ru/articles/1954/1/e> DOI: 10.3367/UFNr.0052.195401e.0161
- [10] Shadrin V.N. On The Possibilities and Ways of Influencing the Radioactive Element Decay Rate. 2009. Available at: <http://tac.tomsk.ru/files/shad1.doc>
- [11] Mikheev V.L., Morozov V.A., Morozova N.V. On the Possibility of Controlled Change of Nuclear Radioactive Decay Rate. *Pisma v Zhurnal "Fizika Elementarnykh Chastits i Atomnogo Yadra"* [Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei, Letters], 2008, vol. 5, no. 4 (146), pp. 623–627 (in Russ.).
- [12] Orlenko L.P. (Ed.). *Fizika vzryva* [Physics of Explosion]. In 2 vol. Vol. 1. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004. 832 p.
- [13] *ENDF/B-VII.1*. LANL. USA. 2014. Available at: <https://t2.lanl.gov/nis/data/endl/> (accessed: 24.04.2015).
- [14] Polikanov S.M. Spontaneously fissioning isomers. *Sov. Phys. Usp.*, 1968, vol. 11, pp. 22–33. DOI: 10.1070/PU1968v011n01ABEH003722
- [15] Okunev V.S. Investigation of Stability of the Magic, Near-Magic and Deformed Atomic Nuclei. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2013, no. 4, pp. 34–55 (in Russ.).
- [16] Okunev V.S. Nature of the Nuclear-Physical Properties of Superheavy Nuclides. *Nauchnaya sessiya NIYaU MIFI–2015. Annotatsii dokl. V 3 t. T. 1. Fundamental'nye issledovaniya i fizika chastits. Atomnaya energetika i yadernye tekhnologii. Yadernye sistemy i materialy. Fizika neravnovesnykh atomnykh sistem i kompozitov* [NRNU MEPhI–2015 Symposium. Abstracts. In 3 vol. Vol. 1. Basic Research and Particle Physics. Nuclear Energy and Nuclear Technology. Nuclear Systems and Materials. The Physics of Nonequilibrium Atomic Systems and Composites]. Moscow, NIYaU MIFI, 2015, p. 130.

- [17] Okunev V.S. Some Regularity in the Properties of Atomic Nuclei. *Nauchnaya sessiya NIYaU MIFI–2014. Annotatsii dokl. V 3 t. T. 1. Fundamental'nye issledovaniya i fizika chastits. Yadernye tekhnologii. Problemy fizicheskogo materialovedeniya. Kompozity. Yadernaya meditsina [NRNU MEFhI–2014 Symposium. Abstracts. In 3 vol. Vol. 1. Basic Research and Particle Physics. Nuclear Technology. Physical Problems of Material Science. Composites. Nuclear Medicine]. Moscow, NIYaU MIFI, 2014, p. 127.*
- [18] Okunev V.S. The Importance of the Atomic Nuclei Stabilization Factors. *Nauchn. sessiya NIYaU MIFI–2014. Annotatsii dokl. V 3 t. T. 1. Fundamental'nye issledovaniya i fizika chastits. Yadernye tekhnologii. Problemy fizicheskogo materialovedeniya. Kompozity. Yadernaya meditsina [NRNU MEFhI–2014 Symposium. Abstracts. In 3 vol. Vol. 1. Basic Research and Particle Physics. Nuclear Technology. Physical Problems of Material Science. Composites. Nuclear Medicine]. Moscow, NIYaU MIFI, 2014, p. 127.*
- [19] Okunev V.S. Study of Stabilization Effects and Proton Richness Influence on Nuclear-Physical Properties of Heavy Nuclides. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.]*, 2011, no. 4, pp. 81–98 (in Russ.).
- [20] Charles Rahn Fry et al. A Guide to Nuclear Power Technology.

Статья поступила в редакцию 26.05.2015

Марахтанов Михаил Константинович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой “Плазменные энергетические установки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Marakhtanov M.K. — Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Plasma Power Installations department, Bauman Moscow State Technical University. Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Окунев Вячеслав Сергеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры “Ядерные реакторы и установки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Okunev V.S. — Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of Nuclear Reactors and Installations department, Bauman Moscow State Technical University. Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

### **Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Марахтанов М.К., Окунев В.С. Влияние механических столкновений макрообъектов на ядерно-физические свойства составляющих их тяжелых нуклидов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2016. № 1. С. 61–75.  
DOI: 10.18698/1812-3368-2016-1-61-75

### **Please cite this article in English as:**

Marakhtanov M.K., Okunev V.S. Influence of mechanical collision macroobjects on nuclear-physical properties of components of their nuclides. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.]*, 2016, no. 1, pp. 61–75.  
DOI: 10.18698/1812-3368-2016-1-61-75