

539(09)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ ЛЕГКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

*И.И. Гуревич, Я.Б. Зельдович, И.Я. Померанчук,
Ю.Б. Харитон*

Предлагается использование для взрывных целей ядерной реакции превращения дейтерия в водород и тритий, осуществляемое детонационным способом

Введение. Весьма желательно расширение круга элементов, ядерная реакция которых может быть использована практически для энергетических или взрывных целей. До настоящего времени все известные процессы практического использования ядерной реакции основывались на осуществлении цепной реакции деления: реакция происходит под действием нейтронов, при реакции образуются дополнительные нейтроны.

Ядерная реакция деления происходит лишь с ураном, торием и новыми, образующимися из урана и тория элементами.

Известно, что энергии ядерных реакций легких элементов, отнесенные на единицу веса, в ряде случаев больше энергии деления тяжелых ядер. Таким образом, запас энергии легких элементов не меньше, чем у тория или урана.

Ядерные реакции легких элементов рассматривались как источник энергии в звездах.

Процессы, предлагавшиеся для звездных реакций, отличаются тем, что в них входит бета-распад, требующий значительного времени; поэтому осуществление их в земных условиях невозможно.

Однако можно предложить ряд других реакций, без бета-распада приводящих к выделению части ядерной энергии легких элементов. Во всех случаях для использования ядерной энергии легких элементов необходимо проведение ядерной реакции одноименно заряженных ядер. Реакция одноименно заряженных ядер всегда требует определенной минимальной энергии соударяющихся ядер; при меньшей энергии соударения вероятность реакции резко падает.

С другой стороны, заряженная частица гораздо чаще обменивается энергией с электронами и ядрами, нежели вступает в ядерную реакцию. Поэтому в обычных условиях (при невысоких температурах) в ядерную реакцию вступает весьма малая часть заряженных частиц, которым была сообщена начальная энергия, реакция будет затухающей.

Ядерная реакция будет происходить не затухая лишь при весьма высоких температурах всей массы, так как только в этом случае в среднем потеря энергии заряженной частицы компенсируется обратным процессом передачи энергии от высоконагретых электронов и ядер рассматриваемой частице.

Энергия ядерной реакции, распределенная между всеми ядрами и электронами, входящими в систему, достигает для многих реакций 1 — 2 МэВ.

Таким образом, этой энергии достаточно для возбуждения быстрой ядерной реакции.

В полном термическом равновесии значительная часть энергии превращается в излучение; это обстоятельство ограничивает равновесную среднюю энергию заряженных частиц величиной 5000 — 15000 эВ, совершенно недостаточной для проведения быстрой ядерной реакции.

Медленная ядерная реакция легких элементов, при средней энергии около 10000 эВ, практически невозможна по той причине, что отвод энергии излучением в ходе медленной реакции приведет к быстрому падению температуры и полному прекращению реакции.

Условия проведения реакции. Исходя из вышеизложенного, мы предлагаем осуществление реакции в условиях, отличающихся:

- а) большой энергией реакции, отнесенной на 1 частицу;
- б) малой энергией, необходимой для проведения реакции с большим сечением взаимодействия, для этого желательно использование реакции ядер с малым зарядом;
- в) проведением реакции в системе с наименьшим коэффициентом поглощения и коэффициентом испускания рентгеновых лучей с целью получить неравновесное распределение, при котором по возможности вся энергия была бы заключена в кинетической энергии заряженных частиц, а количество энер-

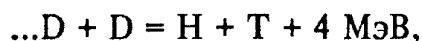
гии, перешедшей в излучение, было бы минимально; для этой цели также необходимо применение ядер с малым зарядом;

г) осуществлением реакции по типу детонации.

Смысл этого условия заключается в том, что по массе реагирующего вещества распространяется ударная волна; энергия разогрева в ударной волне — того же порядка, что и энергия реакции. Разогрев в ударной волне происходит за весьма малое время порядка времени пробега заряженных частиц. Вслед за этим разогретое в ударной волне вещество реагирует, выделяет энергию и расширяется, толкая дальше перед собой ударную волну. Процесс дает принципиально возможность взрыва неограниченного количества легкого элемента, пригодного для реакции от заданного достаточно мощного начального импульса.

Подчеркнем, что суждение о возможности взрывной ядерной реакции связано с применением современной теории детонации, развитой в Институте химической физики.

Конкретное предложение. В качестве системы, удовлетворяющей выдвинутым условиям, нами предлагается дейтерий; при детонации дейтерия идут реакции



Особенно ценным является то обстоятельство, что, благодаря малому заряду ядер значительные сечения для реакции достигаются уже при малой энергии ($5 \cdot 10^{-26} \text{ см}^2$ для каждой реакции при энергии соударения относительно центра тяжести в 200 кэВ). По той же причине превращение кинетической энергии в излучение достаточно мало и составляет при средней энергии около 200 кэВ примерно 1/5 энергии, выделяющейся при ядерной реакции.

Минимальный диаметр длинного заряда дейтерия, судя по имеющимся данным о зависимости сечения реакции от энергии частиц, может не превышать 30 см. Обоснование приведенных цифр см. в Приложении.

Желательна наибольшая возможная плотность дейтерия, которая должна быть осуществлена применением его при высоком давлении.

Для облегчения возникновения ядерной детонации полезно применение массивных оболочек, замедляющих разлет.

Наиболее трудным вопросом является вопрос инициирования, так как в уране или в плутонии взрыв развивается сравнительно медленно и соответственно весьма значительная часть энергии взрыва успевает перейти в излучение, вследствие чего температура и давление ядер и электронов оказываются сравнительно невысокими.

В настоящее время остается неясным вопрос о влиянии излучения на процесс расширения урана, передающего давление дейтерию. Для улучшения условий инициирования представляется возможным применение урановых зарядов увеличенных размеров и специальной формы (кумуляции) и введении в дейтерий вблизи инициатора тяжелых элементов, которые могли бы воспринимать импульс излучения.

Однако даже при остающихся неясностях в вопросе инициирования, нам представляется весьма существенным открытие системы, в которой от одного мощного импульса может быть вызвана ядерная детонация неограниченно большого количества вещества.

Приложение. Возможность проведения ядерной реакции определяется соотношением между энергией, выделяемой на излучение электромагнитных волн, и энергией ядерного расщепления. Если это отношение меньше единицы, то ядерная реакция может развиваться. Энергия, излучаемая в 1 с в 1 см³, равна

$$U_r = \frac{16}{3} \frac{e^2}{\hbar c} (1 + \beta) \left(\frac{e^2}{mc^2} \right)^2 v_e N^2 E. \quad (1)$$

Здесь v_e — скорость электрона, N — число электронов в 1 см³, E — энергия электрона, включая покоящуюся, β учитывает излучение при столкновении между электронами, $\beta \approx 1$, а суммируемая с $\beta - 1$ отвечает столкновению электрона с дейтроном.

Энергия, выделяемая при ядерных расщеплениях в 1 с в 1 см³, равна

$$U_d = \sqrt{2} \sigma_c v_d N^2 \epsilon, \quad (2)$$

где ϵ — энергия, выделяющаяся при одном акте ядерной реакции, σ_c — сечение расщепления, v_d — скорость дейтрона.

$$\frac{U_r}{U_d} = \frac{1 + \beta}{120x}, \quad (3)$$

где x связано с σ_c соотношением

$$\sigma_c = x \cdot 10^{-24} \text{ см}^2.$$

Формула (3) получена для энергий E , равных 1/2 МэВ. Такое значение E получается из учета разогрева дейтерия во фронте ядерной детонационной волны (по аналогии с разогревом газов в детонационной волне, согласно теории Я.Б. Зельдовича) при полной энергии ядерной реакции 4 и ее равномерном распределении между всеми частицами (2 дейтрона и 2 электрона).

Положив x равным 1/20 (экспериментальные данные Аллена и др., Phys. Rev. 1939. V. 56, P. 383) получаем

$$\frac{U_r}{U_c} = \frac{1 + \beta}{\sigma}.$$

Таким образом, это отношение меньше единицы, что благоприятствует развитию ядерной реакции.

Детонационная волна может распространяться по дейтериевому «заряду» лишь в том случае, если его размер достаточно велик. Этот минимальный размер по порядку величины равен произведению скорости звука на время

реакции. Последнее определяется выражением

$$\tau = \frac{\Lambda}{v_d} = \frac{1}{\sqrt{2} N \sigma_c v_d}.$$

Скорость звука

$$c \approx \frac{2}{3} v_d.$$

Критический диаметр

$$d \approx c \tau \approx \frac{3}{2\sqrt{2} N \sigma_c} \approx \frac{1}{2} \text{ м.} \quad (4)$$

Эта величина может фактически оказаться меньшей, если «заряд» будет заключен в массивную оболочку, и также благодаря тому, что будет происходить альтернативная реакция $D(D, n)\text{He}^3$, которая будет увеличивать энергию выделения и сокращать время реакции.

1946 год