

О ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ ЭФФЕКТЕ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ ЧЕРЕЗ КОНДЕНСИРОВАННОЕ ВЕЩЕСТВО

В.И. Гольданский, Е.Я. Ланцбург, П.А. Ямпольский

При прохождении осколков деления по конденсированному веществу гидродинамический механизм передачи энергии приводит к возникновению кратковременного сжатия вещества в окрестности трека осколка, что, в свою очередь, может увеличить концентрацию активных частиц, которые стимулируют протекание различных химических процессов.

1. При прохождении тяжелых заряженных частиц через вещество на небольшой длине пробега выделяется очень большая энергия. Так для осколков деления удельная ионизация составляет $\approx 30000 \text{ Мэв}\cdot\text{г}\cdot\text{см}^{-2}$ причем электронам тормозящей среды передается до 90% кинетической энергии частицы. Оценим величину объемной энергии, выделившейся при прохождении осколка деления через конденсированное вещество (например, воду). Пробег осколка деления составляет $L_f \approx 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ см}$ [1]. Ширина трека осколка деления определяется, в основном, длиной пробега вторичных электронов, возникающих при взаимодействии осколков деления с атомами среды. По данным работы [2] радиус трека равен $R_0 = 6 \cdot 10^{-7} \text{ см}$. Таким образом, область, в которой выделяется кинетическая энергия осколков деления, представляет цилиндр с длиной L_f и радиусом R_0 . Объем этого цилиндра равен $V_f = \pi R_0^2 L_f = 3 \cdot 10^{-15} \text{ см}^3$. Начальная скорость осколков деления $(1+1,4) \cdot 10^9 \text{ см/сек}$, время пробега $t_f \approx 10^{-12} \text{ сек}$. Время пробега вторичных электронов меньше t_f и составляет приблизительно $\sim 10^{-15} \text{ сек}$. Величина t_f существенно меньше всех других характерных возможных времен диссипации энергии. Поэтому можно принять, что вся энергия осколка деления выделяется внутри объема трека мгновенно. Если считать, что энергия осколков $E = 100 \text{ Мэв}$, то плотность выделившейся энергии будет $E/V_f \approx 5 \cdot 10 \text{ эрг/см}^3$, это соответствует давлению, приблизительно, 50 кбар .

2. Эффект воздействия выделившейся кинетической энергии осколка на тормозящее вещество зависит от механизма дальнейшей передачи этой энергии веществу. Один из возможных механизмов — теплопроводный — рассматривался в работах [3] и [4]. Этот процесс характеризуется временем $t_{\text{ТП}} \sim L^2/\chi$, где χ — коэффициент температуропроводности, который у воды порядка $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{сек}$, а L — некоторый характерный размер (например, длина L_f или радиус R_0 трека осколка). Представляется, что более эффективным механизмом передачи энергии веществу может оказаться гидродинамический (ГД) механизм.

Действительно, характерное ГД время $t_{ГД} \sim L/c_0^2$, где c_0 — скорость звука в конденсированном веществе, (для воды $c_0 \approx 1,5$ км/сек). Легко убедиться, что для L порядка L_f или R_0 , $t_{ГД} \ll t_{тп}$. Применимость ГД описания процесса передачи энергии от источника среде определяется тем, что характерные линейные размеры области возмущения гораздо больше межмолекулярных расстояний и пробегов частиц вещества.

3. Оценим указанный ГД механизм переноса в среде энергии, первоначально выделившейся внутри трека, считая, что по веществу распространяется ударная волна, фронт которой концентричен цилиндрической поверхности источника. Так как поперечный размер трека гораздо меньше его продольного размера, оценку выполним для ударной волны от бесконечно протяженного "нитевидного" мгновенного источника с заданным энерговыделением E_0 на единицу длины "нити". Пусть $D = dR/dt$ — скорость распространения по веществу фронта ударной волны (ФУВ) радиуса $R(t)$. v — скорость вещества за ФУВ, ρ_0, ρ — плотность вещества перед и за ФУВ, а P — давление на ФУВ, которое будем считать много большим "давления" перед фронтом. Тогда из условий сохранения массы, импульса на ФУВ и энергии в области, охваченной фронтом, получим:

$$E_0 = \pi R^2 \rho_0 D^2 F(\delta, n), \quad (1)$$

$$P = \rho_0 D^2 (1 - 1/\delta),$$

где $F(\delta, n)$ — функция сжатия, $\delta = \rho/\rho_0$, которое здесь будем для оценок рассматривать как некоторый параметр, а n — показатель степени в "уравнении состояния" вещества $P \sim \rho^n$ (в таком виде уравнение состояния учитывает только "холодную" часть давления, так как в рассматриваемых условиях "тепловой" частью давления можно пренебречь). В конденсированном веществе при давлении порядка $10^4 - 10^5$ атм сжатие не слишком превышает единицу и у воды, например, $\delta \leq 2$, кроме того, для воды $n = 7$. Для $\delta = 3/2$ и $n = 7$ $F \approx 0,3^{11}$. Решая дифференциальное уравнение (1) при начальном условии $t = 0$ $R = R_0$, получаем

$$R(t) = R_0 (1 + t/t_0)^{1/2}, \quad \text{где } t_0 = R_0^2 \left(\frac{\pi}{4} \frac{F \rho_0}{E_0} \right)^{1/2} \quad \text{Для } R_0 \approx 6 \cdot 10^{-7} \text{ см,}$$

$F = 0,3$ ($\delta = 3/2$), $\rho_0 \approx 1$ г/см³ и $E_0 = 10^5$ Мэв/см следует, что $t_0 \approx 10^{-12}$ сек, т. е. порядка времени пробега осколка в среде. Для $t > t_0$ получаем $R(t) = 0,68 \sqrt{t}$ см. Следовательно, скорость ФУВ $D \approx 0,34 \sqrt{t}$ см/сек, а давление $P \approx 5,8 \cdot 10^{-8}/t$ атм (время t выражено в сек). Для $t \approx 10^{-12}$ сек из этих формул следует, что $R \approx 0,7 \cdot 10^{-6}$ см, $D \approx 3,4$ км/сек, а давле-

¹¹ При определении функции $F(\delta, n)$ для упрощения оценок предполагалось, что внутри области, охваченной волной, все параметры распределены равномерно.

ние $P \approx 6 \cdot 10^4$ атм, что соответствует начальным условиям. Полученные оценки дают значения величин D и P , близкие по порядку величины (с точностью до нескольких единиц) к экспериментальным значениям для воды [6]: при $P \approx 56,8$ кбар, $\delta = 1,52$, $D = 4,09$ км/сек, $v = 1,39$ км/сек. Поскольку при близком элементном составе вещества давление, развивающееся в окрестности трека осколка увеличивается как ρ^3 , где ρ - плотность то ГД эффект в конденсированном, более тяжелом, чем вода, веществе будет выражен сильнее.

4. Ударное сжатие воды приводит к резкому увеличению концентрации электронов. Так, согласно [7] при давлении ≈ 60 кбар электропроводность воды (а, следовательно, и концентрация электронов) увеличивается в 10^4 раза по сравнению со случаем нормального давления.

Таким образом, при прохождении осколков деления по конденсированному веществу, в частности, по биологической ткани, в числе различных механизмов передачи энергии веществу необходимо также учитывать и ГД механизм. В результате кратковременного сжатия вещества в окрестности трека осколка возникает ударная волна, сопровождаемая скачком температуры за фронтом. Это приводит к увеличению концентрации активных частиц (электронов, ионов, радикалов), которые могут стимулировать протекание различных химических процессов.

Институт химической физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
3 февраля 1975 г.

Литература

- [1] Справочник по ядерной физике под ред. Л.А.Арцимовича, ГИФМЛ, 1963.
- [2] A.Mozumder. Adv. Rad. Chem, 1, 1969, p. 80,
- [3] V.I.Goldanskii, Yu. M.Kagan. Intern. J.Appl. Radiat. Isotopes. 11, 1, 1961.
- [4] И.М.Лифшиц, М.И.Каганов, Л.В.Танатаров. АЭ, 6, 391, 1959.
- [5] Р.Коул. Подводные взрывы, ИИЛ. 1950.
- [6] J.M.Walsh, I.Rice, J.Chem. Phys., 26, 815, 1957
- [7] H.David, S.Haman. Trans, Farad. Soc., 55, 72, 1959.