

Настольная термоядерная установка?

Б.Ф. Костенко, Я. Прибиш

Лаборатория информационных технологий, ОИЯИ

По-видимому, впервые предположение о возможности осуществления реакций термоядерного синтеза в кавитационных пузырьках высказал известный специалист по ультразвуковой акустике профессор Рочестерского университета Х.Г. Флинн в 1978 году, оформивший свое предположение в виде соответствующего патента США. Новый импульс этому направлению придало открытие однопузырьковой сонолюминесценции в 1992, которая сопровождается, если судить по спектру регистрируемого излучения, температурами не ниже $10^4 - 10^5$ К. С тех пор появилось много публикаций, в том числе и в самых авторитетных журналах (см., например, [1]), в которых обосновывается эта идея. Был запатентован ряд новых установок, концентрирующих акустическую энергию в малых пространственно-временных областях и даже созданы научно-коммерческие объединения такие, как *Acoustic Fusion Technology Energy Consortium*, призванные способствовать развитию этой области исследований.

Наиболее достоверные результаты, подтверждающие возможность осуществления реакций термоядерного синтеза при акустической кавитации были получены в экспериментах с дейтерированным ацетоном. Так, в работе [2] было сообщено о регистрации продуктов термоядерных реакций $D(d,p)T$ и $D(d,n)^3He$ на уровне 10^5 с⁻¹ при ультразвуковой кавитации в C_3D_6O . Критический анализ публикаций, посвященных обсуждению полученных в [2] результатов, показал, что к этим данным следует отнести самым серьезным образом [3]. Последние экспериментальные данные по наблюдению продуктов ядерных реакций при схлопывании кавитационного пузырька в D-ацетоне приведены в [4, 5]. Они по-прежнему свидетельствуют в пользу этой новой, чрезвычайно простой возможности осуществления реакций термоядерного синтеза. В настоящее время заканчивается подготовка совместного эксперимента ОИЯИ—Институт физико-технических проблем по независимой проверке этих результатов [6, 7, 8] (работа поддержана Международным научно-техническим центром и Российским фондом фундаментальных исследований).

Наиболее детальное к настоящему времени описание процесса схлопывания кавитационного пузырька в дейтерированном ацетоне, объясняющее выход продуктов термоядерных реакций было дано академиком Р.И. Нигматулиным с соавторами, которые положили в основу расчета программу HYDRO, разработанную У.С. Моссом с сотрудниками [9], с рядом добавлений, позволяющих распространить теорию в область более высоких температур и давлений (см. последние по этому поводу публикации [10, 11]).

Описание процесса схлопывания пузырька основано на численном решении системы уравнений в форме законов сохранения массы, энергии и импульса для газообразной и жидкой фаз в приближении сферической симметрии коллапсирующей кавитационной полости, учитывающих скорость, давление и температуру сред. В систему входят также уравнения состояния и условие Герца-Кнудсена-Ленгмюра на границе фазового раздела, учитывающее коэффициент конденсации α . Для ацетона $\alpha = 1$, т.е. доля молекул пара, которые ударяются о поверхность раздела фаз и отражаются обратно, пренебрежимо мала. По этой причине общая масса пара при сжатии пузырька быстро уменьшается. Кроме того, в случае поглощения молекулы

границе раздела передается импульс в два раза меньше, чем при ее отражении. Все это сильно снижает сопротивление паров схлопыванию пузырька и является одной из основных причин создания высоких температур и давлений при акустической кавитации в D-ацетоне. При сверхвысоких давлениях используются уравнение состояния Ми-Грюнайзена, потенциальные функции Борна-Майера, которые описывают сверхсжатые жидкости, и современные экспериментальные данные об адиабате ударной волны в ацетоне. Учитываются диссоциация и ионизация молекул в момент схлопывания пузырька, и соответствующие им потери энергии, а также влияние молекулярной, электронной и ионной теплопроводности. Согласно данной модели, значения температуры ионов T и плотности ρ в пузырьке на стадии схлопывания достигают значений $T \simeq 10^7 \div 10^8$ К, $\rho \simeq 100$ г/см³ на расстояниях $r \simeq 5 \div 25$ нм от центра пузырька в течение времени $\Delta t \simeq 10^{-13} \div 10^{-12}$ с.

Выход термоядерных нейтронов в расчете на один пузырек может быть рассчитан по формуле

$$n = \int dt \int dV \frac{n_D^2}{2} \langle v\sigma(v) \rangle,$$

где n_D — объемная концентрация ядер дейтерия; $\langle v\sigma(v) \rangle$ — эффективная скорость реакций $D - D$ -слияния. Он оказывается в хорошем согласии с экспериментом [3].

В данной модели, в соответствии с гипотезой Р.И. Нигматулина, для диссоциированной фазы берутся те же уравнения состояния, что и для недиссоциированного ацетона (“замороженная” ударная адиабата). Хотя подобное предположение и противоречит экспериментальной ударной адиабате, оно может быть оправдано быстротечностью завершающей стадии процесса схлопывания. Поскольку характерные времена протекания процесса в данном случае существенно короче, чем в прямых экспериментах по измерению показателя адиабаты, можно допустить, что существенная перестройка пространственных положений фрагментов, по сравнению с их расположением в молекулах, не успевает произойти. Таким образом, физический смысл гипотезы Нигматулина сводится к приближенному учету термодинамической неравновесности процесса.

Кроме этой гипотезы, в теоретическом описании используются два правдоподобных, хотя и не доказанных экспериментально, предположения (также сформулированные Р.И. Нигматулиным) о том, что в многопузырьковой системе в акустическом поле во время схлопывания формируется дополнительный положительный импульс давления в несколько десятков атмосфер и о том, что электроны плазмы не успевают нагреться за время схлопывания ($\sim 10^{-12}$ с). Первое из этих предположений было обосновано в ряде теоретических работ (см. ссылки в [10]). Оценки времени охлаждения ядер электронами в сверхплотной сильно неравновесной плазме схлопывающегося пузырька были выполнены в наших работах [12, 13]. Они показали, что начальные температуры электронов в момент образования сверхплотной плазмы с $\rho \simeq 100$ г/см³ действительно существенно ниже ядерных, а время охлаждения ядерной компоненты — того же порядка, что и время протекания термоядерного синтеза (см. рис. 1).

Оценка начальной температуры электронов потребовала знания их теплоемкости. В работе [14] была сформулирована модель и выполнен расчет теплоемкости электронов в области температур и плотностей $T_e \simeq 10^4 \div 10^8$ К, $\rho \simeq (1 \div 100)\rho_0$ (см. рис. 2). Такие оценки являются необходимым шагом в направлении учета эффектов охлаждения ядер электронами на более поздних стадиях процесса схлопывания пузырька.

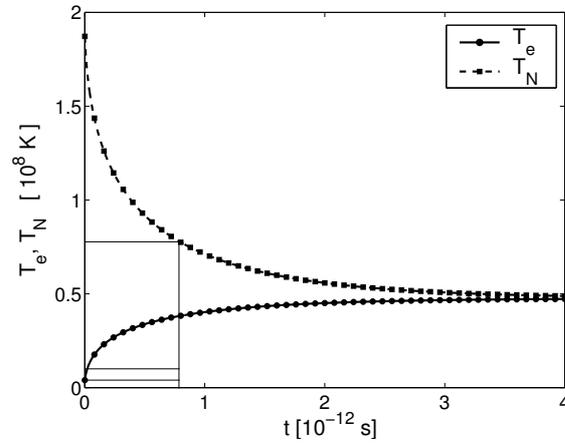


Рис. 1: Временная эволюция температуры ядер $T_N(t)$ и электронов $T_e(t)$ с учетом зависимости времени релаксации τ_{Ne} от $T_e(t)$, рассчитанная с помощью уравнения Ландау $dT_e/dt = (T_{eq} - T_e)/\tau_{Ne}$. На оси температур отмечена точка, отвечающая уменьшению начальной температуры ядер в $e \simeq 2,72$ раз, а также две точки, соответствующие двум возможным начальным температурам электронов: $T_e(0) = 4 \cdot 10^6$ К и $T_e(0) = 10^7$ К. Видно, что характерное время ядерно-электронной релаксации оказывается порядка $8 \cdot 10^{-13}$ с и слабо зависящим от начальной температуры электронов $T_e(0)$

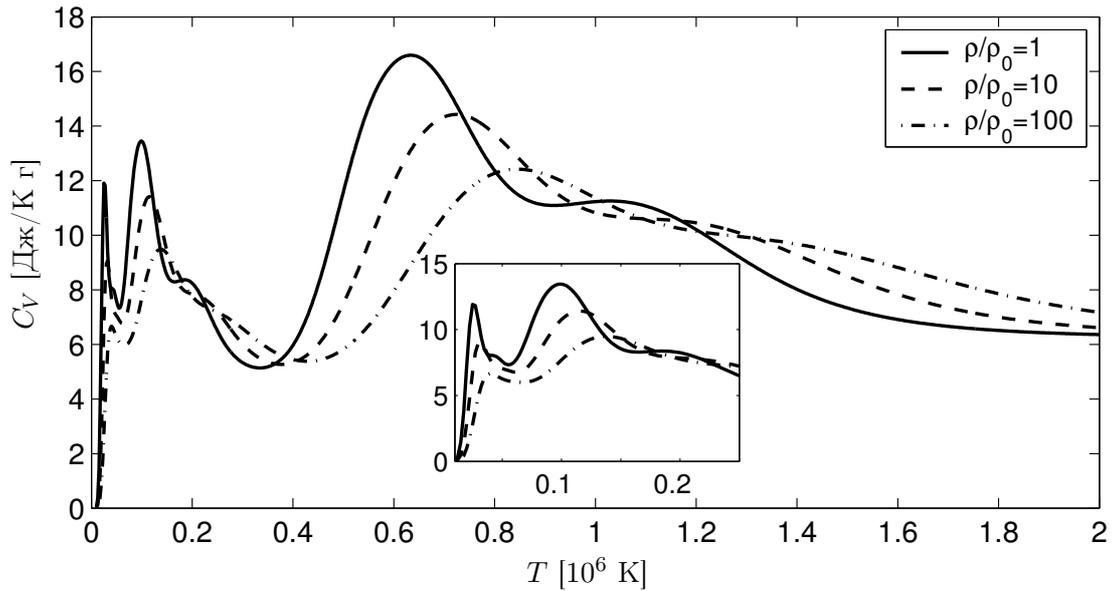


Рис. 2: Теплоемкость электронов для молекулы D-ацетона при разных сжатиях ρ/ρ_0 , рассчитанная в соответствии с моделью, предложенной в [13, 14]

Список литературы

- [1] *Barber B.P., Hiller R.A., Lofstedt R., Putterman S.J., Weninger K.R.* // Phys. Rep. 1997. V.281. P.65–143.
- [2] *Taleyarkhan R.P., West C.D., Cho J.S., Lahey Jr. R.T., Nigmatulin R.I., Block R.C.* // Science. 2002. V.295. P.1868–1873.
- [3] *Беляев В.Б., Костенко Б.Ф., Миллер М.Б., Сермягин А.В., Топольников А.С.* // Сверхвысокие температуры и акустическая кавитация. Сообщения ОИЯИ РЗ-2003-214, Дубна, 2003.
- [4] *Taleyarkhan R.P., Cho J.S., West C.D., Lahey Jr. R.T., Nigmatulin R.I., Block R.C.* // Phys. Rev. E. 2004. V.69. P.036109.
- [5] *Xu Y., Butt A.* // Nuclear Engineering and Design, 2005. V.235. P.1317.
- [6] *Миллер М.Б., Сермягин А.В., Соболев Ю.Г., Костенко Б.Ф.* // Сообщение ОИЯИ Р13-2004-214, Дубна, 2004.
- [7] *Костенко Б.Ф., Миллер М.Б., Покотилковский Ю.Н.* Сообщение ОИЯИ Р7-2004-215, Дубна, 2004.
- [8] *V.B. Belyaev, B.F. Kostenko, M.B. Miller, A.V. Sermyagin* // Peculiarities of localization of several sonoluminescent bubbles in spherical resonators, e-print <http://xxx.itep.ru/archive/physics/0401069>
- [9] *Moss W.C., Clarke D.B., White J.W., Young D.A.* // Phys. Lett. A. 1996. V.211. P.69; Phys. Fluids. 1994. V.6. P.2979.
- [10] *Nigmatulin R.* // Nuclear Engineering and Design. 2005. V.235. P.1079.
- [11] *Lahey R.T.Jr., Taleyarkhan R.P., Nigmatulin R.* // Proc. XI Intern. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, Avignon, France, October 2-6, 2005.
- [12] *Костенко Б.Ф., Прибиш Я.* // Оценка времени охлаждения ядер электронами в сверхплотной сильно неравновесной плазме. Сообщение ОИЯИ Р4-2004-42, 2004.
- [13] *Прибиш Я.* // Математическое моделирование процессов высокотемпературной релаксации в электронно-атомных системах. Автореферат на соискание ученой степени к.ф.-м.н., Дубна, 2005.
- [14] *Б.Ф. Костенко, Я. Прибиш* // Теплоемкость электронов в плазме, образующейся при схлопывании кавитационного пузырька в D-ацетоне. Сообщение ОИЯИ Р11-2004-139, 2004.