

УДК 53.01

КАВИТАЦИЯ: УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИО. Б. Хаврошкин¹

Предложен метод увеличения температуры и давления в схлопывающемся пузырьке за счет применения центрифугирования. На основе предлагаемого метода рассматривается возможность не только продвинуться в изучении акустического (кавитационного) нуклеосинтеза (Sono-Fusion), но и других актуальных проблем, например, механокрекинга тяжелых углеводородов.

Ультразвуковая техника и кавитация не только обычная составляющая современной технологии [1, 2], но и инструмент многих физических исследований [3–5]. К наиболее актуальным направлениям в настоящее время следует отнести поиск метода эффективного соно-крекинга тяжелых углеводородов, синтез алмазов при кавитации и инициирование ядерных реакций синтеза или Sono-Fusion [6–9]. Наиболее экстремальные параметры кавитации необходимы при проведении Sono-Fusion [8–11]. При этом для создания в ядре схлопывающейся кавитационной полости с высокотемпературной плотной плазмой с параметрами по температуре $T \sim 10^7 - 10^8$ К и давлению $P \sim 10^7$ атм. и более используют различные аппаратурно-методические подходы [2, 9–12].

Известны простейшие соотношения, следующие из уравнения Рэлея [1] и описывающие значительную часть стадии схлопывания кавитационного пузырька:

$$P_{\max} = Q \left[\frac{(\gamma - 1)P_0}{Q} \right]^{\frac{r}{r-1}},$$

$$T_{\max} = T_0 \left[\frac{(\gamma - 1)P_0}{Q} \right]^{3(r-1)},$$

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

где: Q – давление газа в пузырьке при максимальном радиусе; γ – показатель адиабаты; P_0 – давление в жидкости; T_0 – температура окружающей жидкости.

Соответственно для увеличения P_{\max} , T_{\max} достаточно повысить P_0 , что и делается в некоторых технологических процессах [2]. Однако это усложняет оборудование даже при $P_0 \approx 5 \cdot 10^5$ Па, а на стадии схлопывания, когда плазменное ядро внутри полости обжимается ударными волнами со сверхзвуковой скоростью, передать энергию сжатия от общего объема жидкости, например, тяжелой воды на основе дейтерия D_2 , к центральному ядру невозможно по физическим ограничениям: $V_{sw} > V_0$ (V_{sw} – скорость ударной волны, V_0 – скорость звука). Поэтому перспективное использование жидкости, находящейся под высоким давлением P_0 , требует нового физического и аппаратного решения.

Один из главных барьеров при реализации Sono-Fusion – развитие гидродинамических неустойчивостей поверхности стенок на заключительной стадии схлопывания кавитационного пузырька. Для частичного решения этой проблемы проводилась кавитация D_2O на специальных микрзародышах из титана и интерметаллидов, насыщенных дейтерием [12]. Был зарегистрирован выход нейтронов, превышающий статистический фон (превышение ≥ 10 раз), так как зародыш блокировал раннее наступление неустойчивости сходящихся стенок полости. Дальнейший прогресс метода мог быть обеспечен применением дейтерированных зародышей из делящихся материалов, например урана, что экологически неприемлемо.

С другой стороны, параметры P , T полости зависят от отношения R_{\max}/R_{\min} и Q (упругости паров дейтерий-содержащей жидкости), R_{\max} , R_{\min} – соответственно максимальный и минимальный радиус кавитационной полости. Поэтому дальнейший прогресс по Sono-Fusion основывался на значительном увеличении этого отношения и снижении упругости паров [9]. Для этого использовалась жидкость с малым Q (тяжелый ацетон C_3D_6O), а микрзародыши кавитационных пузырьков формировались на основе треков от атомных ядер и частиц. Зарегистрирован уровень выхода нейтронов от D-D реакций синтеза, не требующий статистических методов его подтверждения, то есть параметры P , T достигли $\sim 10^7$ К и 10^6 атм [9, 11].

Дальнейшее продвижение по интенсификации кавитации связывают либо с усилением ударных волн, воздействующих на объем D_2O с пузырьками расчетных размеров, либо с использованием одиночного большого пузыря ($\sim 1 - 5$ см³). В первом случае выход нейтронов сопоставим с [12], второй еще не реализован и не учитывает проблем неустойчивости. То есть существующие методы получения кавитационных процессов

на основе дейтерий-содержащей жидкости, обеспечивающие стабильное получение процессов схлопывания с P, T параметрами свыше 10^7 атм и 10^6 К, эту задачу не решают. Дальнейший прогресс требует управления параметрами кавитации тяжелой воды по P, T в диапазоне $P \approx 10^5 - 10^7$ атм, $T \approx 10^6 - 10^{10}$ К; что решается применением известных методов образования кавитационных пузырьков и ультрацентрифуги. Предлагаемая схема реализации Sono-Fusion поясняется рисунком.

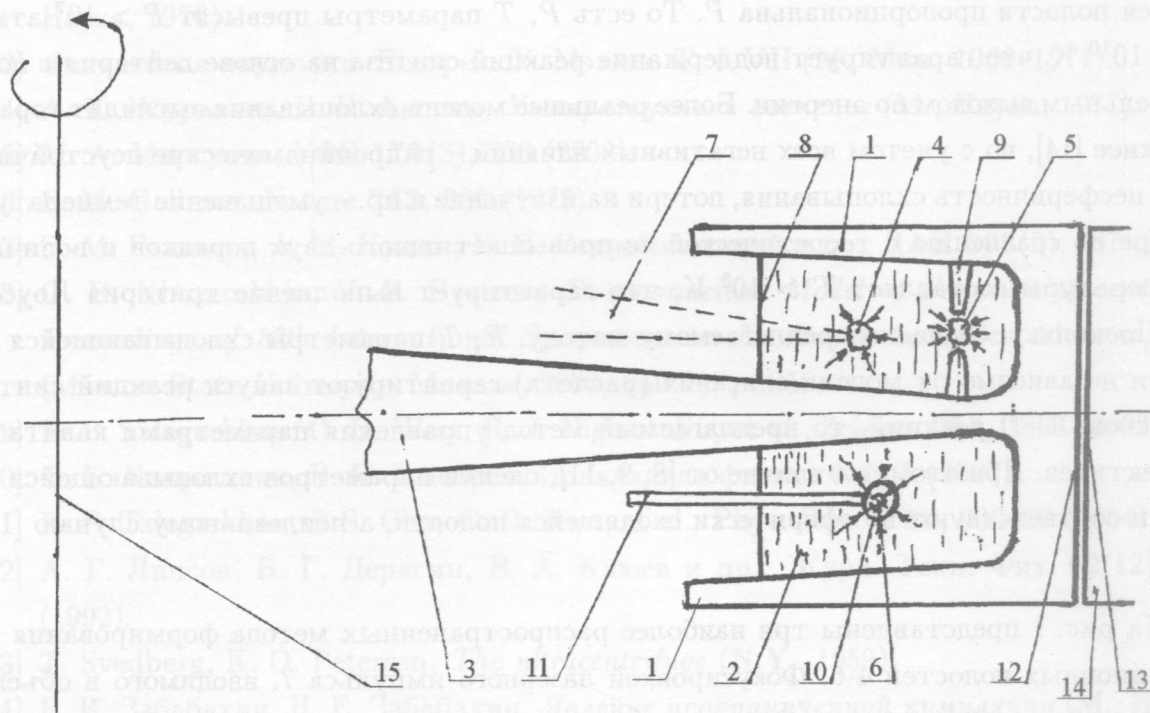


Рис. 1. 1 – двухкамерная, тороидной формы кювета; 2 – тяжелая вода; 3 – ротор центрифуги; 4 – схлопывающаяся кавитационная полость, образованная сфокусированным в объеме 2 лазерным импульсом; 5 – схлопывающаяся кавитационная полость, образованная электроразрядом; 6 – схлопывающаяся кавитационная полость, образованная при обтекании неподвижного кавитатора тяжелой водой; 7 – фокусируемый лазерный импульс; 8 – свободная поверхность воды; 9 – электроды-разрядники; 10 – кавитатор; 11 – кронштейн фиксации кавитатора; 12 – внешняя цилиндрическая поверхность кюветы 1; 13 – внутренняя цилиндрическая поверхность элемента статора 14, сопряженная через незначительный зазор с поверхностью 12; 15 – ось вращения.

При вращении тороидной двухкамерной кюветы 1 с тяжелой водой 2, закрепленной в роторе 3 (см. рис.) на каждый элемент массы m_0 воды действует центробежное

ускорение с величиной V^2/R (V – постоянная тангенциальная скорость; R – радиус вращения элемента массы m_0) или $\omega^2 R$. На жидкость с плотностью ρ действует давление $P = \rho \times a \times Z$, где: Z – высота столба жидкости, a – центростремительное ускорение. При $Z = 10$ см и $a \sim 10^6$ g (в современных центрифугах a достигает свыше 10^6 g [13]) имеем $P \geq 10^4$ атм. При оценке P , T параметров схлопывающейся кавитационной полости 4-6 за счет значения P эти параметры также необходимо увеличить в $10^4 - 10^6$ раз, так как кинетическая энергия потока массы 2 сходящихся стенок пузырька у ядра схлопывающейся полости пропорциональна P . То есть P , T параметры превысят $P > 10^7$ атм, а $T > 10^{10}$ К, что гарантирует поддержание реакций синтеза на основе дейтерия с положительным выходом по энергии. Более реальные модели схлопывания выглядят гораздо сложнее [14], но с учетом всех негативных влияний – гидродинамические неустойчивости, несферичность схлопывания, потери на излучение и пр. – уменьшение температуры в ядре по сравнению с теоретической не превышает одного-двух порядков и величина температуры составляет $T > 10^8$ К, что гарантирует выполнение критерия Лоусона [8]. Поскольку, согласно предлагаемому методу, P , T параметры схлопывающейся полости независимо от модели описания (расчета) гарантируют запуск реакций синтеза на основе D-D реакций, то предлагаемый метод управления параметрами кавитации эффективен. При этом, в отличие от [8, 9, 11], оценки параметров схлопывающейся полости соответствуют не сферически сходящейся полости, а неидеальному случаю [14].

На рис. 1 представлены три наиболее распространенных метода формирования кавитационных полостей 4-6. Фокусировкой лазерного импульса 7, вводимого в объем 2 через свободную поверхность 8; мощным электрическим разрядом, образующимся в объеме 2 между электродами 9 и профилированным кавитатором 10 на кронштейне 11. В принципе, ускорение в центрифуге можно увеличить и свыше 10^6 g за счет, например, электростатической разгрузки ротора 3. Для этого на цилиндрических боковых поверхностях 12, 13 кюветы 1 и неподвижного элемента статора 14 нужно поддерживать существование одноименного электрического разряда. Взаимодействие между поверхностями 12, 13 приведет к разгрузке ротора 3.

Предлагаемый метод позволит по-новому попытаться эффективно решить некоторые принципиальные задачи – Sono-Fusion, механокрекинга. Тем более известны и косвенные подтверждения: при кавитации ртути интенсивность люминесценции возрастает и становится наблюдаемой при дневном освещении. А перевод кавитации с

тяжелой воды на ртуть эквивалентен увеличению m_g в 10 раз (без учета низкой упругости паров).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Л. Бергман, *Ультразвук и его применение в технике* (М., И.Л., 1957).
- [2] *Физические основы ультразвуковой технологии*. Под ред. Л.Д. Розенберга (М., Наука, 1970).
- [3] *Физическая акустика*. Под ред. У. Мэзона. Т. I–VII (М., Мир, 1966–1974).
- [4] А. И. Журавлев, В. Б. Акопян, *Ультразвуковое свечение* (М., Наука, 1977).
- [5] М. А. Маргулис, УФН **170**(3), 263 (2000).
- [6] Е. М. Galimov, *Nature* **243**, 389 (1973).
- [7] Э. М. Галимов, А. М. Кудин, В. Н. Скоробогатский и др., ДАН **393**(2), 187 (2004).
- [8] О. В. Khavroshkin, V. P. Bystrov, *Thermonuclear Model of Sonoluminescence*. In: *Proceedings of 16th International Symposium on Nonlinear Acoustics, Moscow, 2002* (Moscow State University, Moscow, 2003, Vol. 2), p. 959.
- [9] R. P. Talegarkhan, C. D. West, R. J. Nigmatulin, et al., *Science* **295**, 1868 (2002).
- [10] О. Б. Хаврошкин, В. П. Быстров, *Прикладная физика* N 5, 7 (2007).
- [11] R. P. Talegarkhan, J. S. Cho, C. D. Kast, et al., *Phys. Rev. E* **69**, 036109 (2004).
- [12] А. Г. Липсон, Б. Г. Дерягин, В. А. Ключев и др., *Журн. Техн. Физ.* **62**(12), 121 (1992).
- [13] Т. Svedberg, К. О. Petersen, *The ultracentrifuge* (N.Y., 1959).
- [14] Е. И. Забабахин, Н. Е. Забабахин, *Явление неограниченной кумуляции* (М., Наука, 1988).

Печатается по рекомендации

Отдела космических излучений

Поступила в редакцию 27 февраля 2008 г.