

Роторный кавитационный теплогенератор

**Промтов М.А., д.т.н., профессор
Зав. каф. «Машины и аппараты химических производств»
Тамбовского государственного технического университета.**

Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106, Тамбовский государственный технический университет, тел. (007-4752)-63-20-24, -63-27-28, , e-mail: promtov@tambov.ru
<http://www.tstu.ru/r.php?r=structure.kafedra&sort=&id=3>

Современная цивилизация нуждается в замене существующих энергетических технологий на экологически чистые, гарантирующие сохранение биосферы. Это особенно касается энергетики, основанной на сжигании природных запасов угля, нефти, газа, урана. Эффективность получаемой энергии остается незначительной и проблема энергообеспечения и доставки энергии потребителям остается актуальной. Запасы полезных ископаемых и ресурсы дешевого урана исчерпываются. Предполагается, что в ближайшее время потребление природных ресурсов достигнет 25 млрд. тонн, поэтому делаются прогнозы, что запасов природного топлива человечеству хватит примерно на 150 лет.

Атомная энергетика, кроме опасностей эксплуатационного характера, имеет нерешенную проблему захоронения и утилизации ядерных отходов. Успешная реализация программы управляемого термоядерного синтеза в настоящее время проблематична. Решение этой проблемы прогнозируется не ранее 2050 года.

Разрабатываются проекты использования солнечной энергии. Солнечную энергию планируется перерабатывать в электричество путем создания космических электростанций. Для получения мощности в 10 миллионов кВт необходимы солнечные батареи площадью примерно 100 квадратных километров. В микроволновом диапазоне энергию можно будет транспортировать на Землю. На пути решения этой задачи стоят серьезные проблемы создания передающих и приемных систем, работающих в диапазоне СВЧ-волн, небезопасных для биосферы, а также орбитальных солнечных электростанций, представляющих собой крупногабаритные космические объекты.

Перспективным направлением энергетики является также использование энергии естественных природных источников. К ним относят солнечную, ветровую и геотермальную энергию, энергию морских приливов и волн, биомассы (растения, различные виды органических отходов), низкопотенциальную энергию окружающей среды

Указанные источники энергии имеют как положительные, так и отрицательные свойства. К положительным относятся повсеместная распространенность большинства их видов, экологическая чистота. Эксплуатационные затраты по использованию нетрадиционных источников не содержат топливной составляющей. Отрицательные качества - это малая плотность потока (удельная мощность) и изменчивость во времени. Первое

обстоятельство заставляет создавать большие площади энергоустановок, «перехватывающие» поток используемой энергии (приемные поверхности солнечных установок, площадь ветроколеса, протяженные плотины приливных электростанций и т.п.). Это приводит к большой материалоемкости подобных устройств, а, следовательно, к увеличению удельных капиталовложений по сравнению с традиционными энергоустановками. Повышенные капиталовложения впоследствии окупаются за счет низких эксплуатационных затрат, но на начальной стадии они требуют больших финансовых вложений. Больше неприятностей доставляет изменчивость во времени таких источников энергии, как солнечное излучение, ветер, приливы, сток малых рек, тепло окружающей среды. Если, например, изменение энергии приливов строго циклично, то процесс поступления солнечной энергии, хотя в целом и закономерен, содержит, тем не менее, значительный элемент случайности, связанный с погодными условиями. Еще более изменчива и непредсказуема энергия ветра.

Конечным продуктом всей цепи энергетических преобразований, в современных способах получения энергии, является вещество. Причем, это конечное вещество становится, как правило, более опасным для биосферы, чем исходный энергоноситель. Это относится и к энергетике, основанной на сжигании природного топлива, к атомной энергетике и к ядерному синтезу.

Альтернативой существующим способам получения энергии могут стать такие способы, в которых на конечной стадии энергопреобразований не будет появляться опасное для биосферы вещество. Поэтому, в настоящее время направления поисков новых способов получения энергии переместились на альтернативную энергетику и их интенсивность в последние годы бурно возрастает.

В качестве альтернативного источника получения энергии предлагается использование импульсных физико-химических эффектов в жидкости, которые приводят к ее нагреву. Эффективным методом многофакторного воздействия на жидкость является кавитация, которая приводит к изменению физико-химических характеристик жидкости, ее активации и нагреву.

Кавитационные теплогенераторы – это новое, перспективное оборудование. Предварительные опытно-промышленные исследования, проведенные несколькими независимыми разработчиками, показывают, что это эффективное и надежное оборудование. Коэффициент преобразования электрической энергии в тепловую энергию для разных модификаций тепловых генераторов равен 1,2 – 2 единицам. Речь идет именно о коэффициенте теплопроизводительности, а не о КПД, который, составляет около 90–95%.

Механизм получения тепловой энергии за счет кавитации основан на её вторичных нелинейных эффектах в жидкости. Акустическая кавитация представляет собой эффективное средство концентрации энергии звуковой

волны низкой плотности в высокую плотность энергии, связанную с пульсациями и захлопыванием кавитационных пузырьков. В момент схлопывания кавитационного пузырька, давление и температура газа достигают значительных величин.

Энергия, затрачиваемая на образование кавитационного пузырька, заполненного паром, определяется как

$$E_o = 4\pi r^2 \sigma + \frac{4}{3} \pi r^3 (P_o + P_n)$$

В первом приближении принимается $P_o = P_i$.

Энергия сжатия кавитационного пузырька, определяется по формуле

$$E_c = \frac{4}{3} \pi P (r_{\max}^3 - r_{\min}^3) \approx \frac{4}{3} \pi P \cdot r_{\max}^3.$$

При образовании в воде пузырька радиусом 1 мм при температуре $t = 10^\circ \text{C}$, давлении насыщенного пара $P_n = 1,25 \cdot 10^3 \text{ Па}$, поверхностном натяжении $\sigma = 7,28 \cdot 10^{-4} \text{ Н/м}$, энергия образования пузырька равна $E_o = 1,995 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$. Энергия сжатия пузырька жидкостью, находящейся при атмосферном давлении $P = 10^5 \text{ Па}$, равна $E_c = 4,189 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}$. Таким образом, энергия сжатия пузырька более чем в 20 раз превышает энергию его образования.

В таблице 1 приведены значения отношения энергии сжатия и энергии образования кавитационного пузырька при различных значениях давления в жидкости и давления паров в кавитационном пузырьке.

Таблица 1

Значение отношения энергии сжатия к энергии образования кавитационного пузырька при различных значениях давления насыщенных паров в кавитационном пузырьке и давления в жидкости

	$P \cdot 10^5, \text{ Па}$					$P_n \cdot 10^5, \text{ Па}$				
	0.1	0.5	1	1.5	2	0.0238	0.0752	0.2031	0.483	0.715
						$t=20^\circ \text{C}$	$t=40^\circ \text{C}$	$t=60^\circ \text{C}$	$t=80^\circ \text{C}$	$t=90^\circ \text{C}$
$\frac{E_c}{E_o}$	2.1	10.5	20.9	31.5	41.9	20.99	6.65	2.46	1.04	0.69

На основании этих данных можно сделать вывод, что энергия сжатия кавитационного пузырька увеличивается линейно в зависимости от давления в окружающей жидкости. При увеличении температуры воды и, соответственно, давления насыщенных паров, отношение энергии сжатия и энергии образования кавитационных пузырьков уменьшается. При увеличении давления в жидкости, величина отношения энергии сжатия к энергии образования кавитационного пузырька увеличивается.

Для оценки эффективности работы такой системы коэффициент теплопроизводительности можно рассчитать по формуле [3]:

$$K = \frac{(E_c - E_o)\phi}{E_o} = \frac{[r(P - 2P_n) - 3\sigma]\phi}{2r \cdot P_n + 3\sigma}.$$

Массовую концентрацию кавитационных пузырьков, образующих кавитационное облако, можно определить как отношение объема кавитационного облака к объему кавитационного пузырька при максимальном расширении:

$$\varphi = \frac{3 \cdot v_k}{4 \cdot \pi \cdot r_{\max}^3}.$$

Отсюда делается вывод, что если гидравлическая система, в которой работает теплогенератор, открыта по давлению, то сжатие пузырька происходит под давлением окружающей жидкости, то есть происходит приток энергии к жидкости из окружающей среды.

Энергия, сообщаемая жидкости за счет схлопывания кавитационных пузырьков, прямо пропорциональна их количеству. Степень развитости кавитации определяет индекс кавитации, показывающий отношение объема кавитационного облака к общему объему жидкости в активной рабочей зоне. При развитой кавитации значение индекса кавитации стремится к единице.

Опуская промежуточные расчеты и считая, что процесс сжатия пузырька является адиабатическим, можно определить, что максимальная температура и давление в пузырьке при сжатии составляют $T_{\max} \sim 8500$ К, $P_{\max} \sim 10^8$ Па.

Подобные условия имеют место на поверхности Солнца ($T_{\max} \sim 6000$ К, $P_{\max} \sim 10^8$ Па). Это позволяет сделать предположение, что в момент полного сжатия кавитационного пузырька в точечно-ударном виде возможно осуществление ряда элементарных реакций в локальном объеме, окруженном жидкостью.

Предполагается, что кавитация способна инициировать ядерные реакции и способствовать деструкции материи. Подтверждением этому являются исследования, проведенные Р. Талейарханом (R. Taleyarkhan) из Ок-Риджской Национальной Лаборатории (Oak Ridge National Laboratory, Tennessee), Р. Лейхи (R. Lahey) из Политехнического Университета им. Ренсселира (Rensselaer Polytechnic Institute), академиком Р. Нигматулиным (Российская академия наук), а также профессором А. Кладовым (Институт водного хозяйства, Братислава).

В процессах, в которых начинают проявляться ядерные эффекты, нижняя граница амплитуды колебаний начинается примерно от 1700 кПа. Наиболее важные процессы для получения ядерных эффектов происходят во время полупериода сжатия кавитационного пузырька. Под действием внешнего давления кавитационные пузырьки начинают сжиматься. Сферическая граница пузырька с нарастающим ускорением устремляется к центру и сжимает парогазовую смесь, находящуюся в пузырьке. При обычных параметрах давление в пузырьке достигает величины порядка 100 МПа и температура до 10000°С. На этом обычный процесс сжатия кавитационных пузырьков заканчивается.

С повышением давления в звуковой волне увеличивается скорость движения стенки пузырька. По мнению А.Ф. Кладова, эффект начинает проявляться после того, стенка пузырька начнет двигаться со скоростью большей, чем скорость распространения звука в среде внутри пузырька, т.е.

после преодоления звукового барьера. При этом дальнейшее сжатие и разогрев смеси в пузырьке прекращается и начинается обратный процесс снижения давления и температуры за счет конденсации нагретого вещества на поверхности жидкости. В пристеночном слое жидкости при этом повышается плотность жидкости до величины порядка ядерной плотности за счет инерционных сил, т.к. стенка движется с возрастающим ускорением и дополнительного уплотнения от процесса конденсации. Некоторые ядерные реакции могут протекать уже в этом уплотненном слое кавитационного пузырька (это так называемые пикноядерные реакции).

С уменьшением радиуса пузырька скорость движения стенки пузырька неограниченно возрастает. За счет ускорения происходит уплотнение пристеночного слоя жидкости, который работает в данном случае как сферический поршень. Ускорение, тоже неограниченно возрастает при движении стенки пузырька к центру. В начале движения этот поршень сжимает парогазовую смесь в пузырьке. Для того чтобы две капли ядерной жидкости слились в одну, необходима дополнительная энергия. Эту энергию передает каплям кавитационный пузырек в конце своего коллапса. Если кинетическая энергия схлопывающегося кавитационного пузырька будет равна энергии, необходимой для слияния ядер, и не будет ее превышать больше, чем на минимальную энергию возбужденного состояния образовавшегося ядра, то это ядро сохранится. В противном случае образовавшееся ядро может быть разорвано на фрагменты избытком энергии.

Вторым механизмом генерирования тепла в РИА является нагрев жидкости за счет трения в зазоре между ротором и статором. Величина теплообразования зависит от количества энергии, диссипируемой в зазоре. При вращении ротора РИА жидкость нагревается за счет диссипации энергии. Определить температуру нагрева жидкости за промежуток времени $\Delta \tau$ можно исходя из теплового баланса, считая, что тепловые потери отсутствуют:

$$N \cdot \Delta \tau = m_3 \cdot c \cdot \Delta \tau \cdot \Delta t.$$

Изменение температуры жидкости за счет трения в зазоре можно выразить в виде: $\Delta t = \frac{N}{m_3 \cdot c}$.

Количество тепла, переданное жидкости за счет трения в зазоре, равно количеству энергии, диссипируемой в зазоре при вращении ротора. При малой величине зазора расход жидкости через зазор m_3 значительно меньше общего расхода m через РИА. Поэтому в реальных условиях часть жидкости, проходящая через зазор и нагревающаяся в нем, затем смешивается с основным потоком, и поэтому повышение температуры жидкости, прошедшей через зазор, незначительно и зависит от соотношения m_3 и m .

Для определения эффективности работы РИА в качестве теплогенератора необходимо рассчитать следующие параметры:

- количество тепловой энергии затраченной на нагрев жидкости

$$Q_g = M_g \cdot c_g \cdot (t_{кон} - t_{нач});$$

- количество тепла, израсходованное на нагрев оборудования

$$Q_o = M_o \cdot c_c \cdot (t_{кон} - t_{нач});$$

- реальный коэффициент теплопроизводительности

$$K_Q = \frac{Q_e + Q_o + Q_n}{N \cdot 3600};$$

- коэффициент полезного действия (КПД)

$$\eta = \frac{Q_e}{N \cdot 3600}.$$

Энергия, необходимая для работы РИА складывается из энергии, затрачиваемой для вращения ротора и энергии, затрачиваемой для нагнетания жидкости в РИА. Потери тепла в окружающую среду Q_n определяются стандартными методами расчета.

Для определения коэффициента теплопроизводительности и КПД нами были произведены экспериментальные исследования по нагреву воды в одно-, двух- и четырехступенчатом РИА. Исследования проводились на установке, включающей РИА, емкость, насос, расходомер, датчики температуры, счетчик электроэнергии. Вода нагнетается в РИА из емкости насосом, затем направляется обратно в емкость. При работе установки контролировались следующие параметры: температура в емкости и на выходе из РИА; давление на входном и выходном патрубке РИА; расход воды; потребляемая мощность. При работе с многоступенчатым РИА, насос не использовался. Многоступенчатый РИА включал в себя две и четыре ступени соответственно. Каждая ступень состоит из лопастного колеса, ротора и статора. Многоступенчатый РИА представляет собой совмещенную конструкцию центробежного насоса и РИА. Для уменьшения потерь тепла в окружающую среду, все оборудование и трубопроводы были теплоизолированы (рис. 1).

Первая серия экспериментов была произведена на одноступенчатом РИА с водой массой $M_1 = 22 \text{ кг}$, и водой массой $M_2 = 44 \text{ кг}$. Вторая серия экспериментов по нагреву воды массой $M_3 = 230 \text{ кг}$ и $M_4 = 340 \text{ кг}$ проводилась в двухступенчатом РИА. Третья серия экспериментов по нагреву воды массой $M_5 = 250 \text{ кг}$ и $M_6 = 310 \text{ кг}$ проводилась в четырехступенчатом РИА.

Таблица 2

Значения коэффициента теплопроизводительности и КПД

Параметр	Одноступенчатый РИА		Двухступенчатый РИА		Четырехступенчатый РИА	
	Масса воды		Масса воды		Масса воды	
	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
K_Q	1,71	1,81	1,75	1,78	1,73	1,60
η	0,519	0,652	0,548	0,706	0,547	0,576

Значения коэффициента теплопроизводительности и КПД для каждой серии экспериментов приведены в таблице 2. Потери тепла в окружающую

среду принимались равными 10% от тепла, затраченного на нагрев воды и оборудования.

Основываясь на теоретических и экспериментальных результатах проекта, методе и рекомендациях для разработки технологии и оборудования для генерирования тепловой энергии за счет кавитационных эффектов в жидкости, планируется разработать техническую документацию на автономную систему теплоснабжения для жилых и промышленных объектов. Автономная система теплоснабжения (АСТ) предполагает независимость потребителя от централизованной системы обеспечения горячей водой. АСТ включает в себя кавитационный теплогенератор, насосное, контрольно-управляющее и вспомогательное оборудование. Источником энергии для работы АСТ может служить как дизельный, так и электрический двигатель.

Для дальнейшего развития проекта необходимо финансирование для решения поставленных научных и технических задач и изготовления опытных образцов кавитационных теплогенераторов и АСТ. Для этого предполагается привлечь инвестиции в объеме около 30 тысячи долларов США. Интерес к автономным системам теплоснабжения проявляют компании, занимающиеся нефте- и газодобычей, геологоразведкой и добычей полезных ископаемых, строительные компании.

Кавитационные теплогенераторы могут также использоваться для процесса очистки от накипеобразования, различных отложений и загрязнений на внутренних поверхностях и в труднодоступных местах технологического оборудования и трубопроводов. Кавитационная обработка воды изменяет ее физико-химические свойства, увеличивает рН воды, способствует ее активации. В результате кавитационного воздействия вода временно становится активным растворителем без введения химических реагентов.



Рис. 1. Многоступенчатый роторный кавитационный теплогенератор, встроенный в емкость с нагреваемой жидкостью.