

УДК 621.

Ю. И. НЕФЕДОВ, канд. техн. наук, доцент

В. А. СТОРОЖЕНКО, д-р техн. наук, проф.

С. С. БРАГИН

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, г Харьков

КАВИТАЦИОННЫЙ ГИДРОУДАРНЫЙ ГЕНЕРАТОР ТЕПЛА

Указываются основные факторы и некоторые не решенные проблемы, ограничивающие применения в теплоэнергетике кавитационных генераторов тепла. Предложен метод расчета на стадии разработки тепловой мощности таких генераторов, учитывающий все известные механизмы теплообразования при кавитации. Рассматривается разработанный авторами кавитационный теплогенератор-гидротаран повышенной мощности, предназначенный для генерации и транспортировки горячей воды.

Вказуються основні фактори і деякі нерозв'язані проблеми, які стримують втілення в теплоенергетиці кавітаційних генераторів тепла. Запропонована методика розрахунку на етапи розробки теплової потужності таких генераторів, яка враховує усі виявлені механізми кавітаційного теплоутворення. Розглядається розроблений авторами кавітаційний теплогенератор-гидротаран збільшеної потужності, який призначається для утворення і транспортування гарячої води.

Введение

Проблема получения дешевого тепла из воды крайне актуальна сегодня. Поиски экономичных, экологически чистых источников тепловой энергии, не требующих сжигания дефицитного углеводородного топлива привели к созданию разнообразных кавитационных теплогенераторов, отличающихся техническими решениями и используемыми механизмами кавитации. Основными недостатками известных кавитационных теплогенераторов, ограничивающими их широкое применение, являются: небольшая мощность (до 50 кВт), необходимость использования для работы мощных электродвигателей водяных насосов, конструктивная сложность и быстрое разрушение в результате кавитационной эрозии. Предлагаемый кавитационный теплогенератор-гидротаран не имеет указанных недостатков и экономичен в эксплуатации так как приводится в действие энергией движущегося потока воды.

Не решенной проблемой при разработке кавитационных тепло-генераторов является расчет предполагаемой мощности. Данную проблему можно решить, учитывая известные теоретические и экспериментальные данные о процессах теплообразования при кавитации [1–4].

Основная часть

1. Механизмы теплообразования и выделяемая мощность кавитационного теплогенератора

В текущей жидкости, в местах, где ее скорость велика и статическое давление становится равным давлению насыщенных паров, начинается кипение жидкости при низкой температуре (кавитация), сопровождающееся ростом пузырьков растворенного в жидкости газа. При интенсивной кавитации образовавшиеся пузырьки объединяются в сплошную область, именуемую каверной. Увеличение растворенного в жидкости газа приводит к возрастанию интенсивности кавитационных процессов, а, следовательно, к увеличению объема каверны. Каверна может иметь разную форму, но давление паров и газов во всех частях ее объема одинаково. В зависимости от изменения давления вокруг ее свободной поверхности, объем каверны может увеличиваться или уменьшаться. Если это давление быстро увеличивается (скорость роста давления высока) каверна разрушается (схлопывается). В месте разрушения каверны сильно повышается температура и давление

[1–5]. Быстрое увеличение давления вокруг свободной поверхности каверны обычно создается ударной волной, возникающей при гидравлическом ударе, создаваемом в теплогенераторе [5]. Если каверна соприкасается с твердой поверхностью или находится вблизи нее, то в результате гидроудара образуется ударная волна в виде струи высокого давления, которая движется с большой скоростью через каверну, разрушая ее. Схлопывание каверны сопровождается образованием новой ударной звуковой волны, завершающей процесс разрушения оставшихся кавитационных пузырей [1–4].

Механизм схлопывания каверны и пузырей в области высокого давления жидкости можно объяснить на основании физических представлений, аналогичных описанным в литературе [3].

При быстром увеличении давления вокруг каверны (или пузыря), частицы жидкости, расположенные на свободной поверхности каверны с большой скоростью устремляются в область низкого давления – внутрь каверны, образуя разрывы сплошности ее свободной поверхности. Происходит разрыв межмолекулярных связей жидкости. Поэтому под действием сил давления, частицы жидкости устремляются внутрь каверны, наращивая скорость и кинетическую энергию, и сталкиваются между собой внутри разрушающейся каверны. Энергии взаимодействия достаточно для возбуждения атомов и молекул жидкости (люминесценции) и увеличения внутренней энергии жидкости в месте столкновения [1]. Разрушение всех кавитационных образований сопровождается выделением разных видов энергии, поддающихся количественному определению. К ним относятся:

1. Кинематическая энергия E_k движения и соударения частиц свободной поверхности каверны, образующаяся в результате разрыва сплошности жидкости под действием больших сил давления.

2. Энергия E_n , равная теплоте конденсации (или парообразования), выделяемая при конденсации насыщенного пара.

3. Свободная энергия E_c , равная работе, совершаемой силами поверхностного натяжения при уменьшении свободной поверхности каверны и пузырей в момент схлопывания.

Полная тепловая энергия E , выделяется при разрушении всех кавитационных образований, будет равна сумме всех трех составляющих, т. е.

$$E = E_k + E_n + E_c. \quad (1)$$

Определим каждую из составляющих полной внутренней энергии.

Кинетическая энергия E_k частиц жидкости при схлопывании каверны зависит от разности давлений $P - P_k$ между давлением P жидкости возле свободной поверхности каверны, т. е. давлением ударной волны в момент схлопывания, и давлением P_k пара и газа внутри каверны [1]. Кинетическая энергия зависит также от количества движущихся внутри каверны частиц жидкости, т.е. от величины площади свободной поверхности S_k каверны, а, следовательно и ее объема V_k [1, 2]. Другие факторы, влияющие на величину выделяемой энергии, не известны. Указанные величины E_k , $P - P_k$, V_k образуют между собой простую безразмерную комбинацию, из которой можно получить формулу для расчета кинетической энергии:

$$E_k = (P - P_k)V_k \quad (2)$$

Данная формула хорошо согласуется с известными исследованиями [1].

В кавитационных теплогенераторах теплая вода обычно поступает в резервуар, где скапливается и насыщенный пар, выделяемый из всех кавитационных образований как подверженных, так и не подверженных разрушению высоким давлением ударной волны. В резервуаре (конденсоре) этот пар конденсируется. При этом выделяется теплота конденсации, равная теплоте парообразования отобранной при кавитации у текущего потока жидкости. Объем скапливающегося в конденсоре пара может быть значительным. Поэтому

выделяемую при конденсации паром энергию $E_{\text{п}}$ (теплоту конденсации) необходимо учитывать. Эта энергия находится из известного соотношения

$$E_{\text{п}} = m_{\text{п}} r = \rho V_{\text{к}} r, \quad (3)$$

в которой $m_{\text{п}}$ – масса конденсируемого пара;

r – удельная теплота парообразования (конденсации);

ρ – плотность пар;

$V_{\text{к}}$ – объем кавитационных образований (каверны и пузырей).

Разрушение кавитационных образований сопровождается значительным уменьшением площади $S_{\text{к}}$ свободной поверхности каверны и пузырей. При уменьшении свободной поверхности выделяется в виде тепла свободная энергия $E_{\text{с}}$, равная работе сил поверхностного натяжения, которая определяется по формуле:

$$E_{\text{с}} = \sigma S_{\text{к}}, \quad (4)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Учитывая соотношения (1-4), можно определить полную энергию, выделяемую при разрушении всех кавитационных образований:

$$E = (P - P_{\text{к}}) V_{\text{к}} + \rho V_{\text{к}} r + \sigma S_{\text{к}}. \quad (5)$$

При циклической работе любого кавитационного теплогенератора всегда известно время T одного из цикла его работы – время периода теплообразования. Потому выделяемую тепловую мощность P любого кавитационного теплогенератора можно определить по формуле

$$P = \frac{E}{T}, \quad (6)$$

в которой E – полная энергия (5).

Соотношение (5,6) позволяют рассчитать предполагаемую тепловую мощность кавитационного теплогенератора еще на стадии его разработки и проектирования.

2. Устройство и принцип работы кавитационного теплогенератора

Принципиальная блок-схема кавитационного теплогенератора в разрезе показана на рис. 1. Поток воды 1 с небольшой скоростью (примерно 4 м/с) поступает в трубу 2 и далее в дроссельное устройство 3, которое может закрываться и открываться клапанами 4. В начальный момент клапан находится в верхнем положении (рис. 1а) и прерывает поступление воды в бак-конденсор 5. В дросселе скорость потока увеличивается. Далее поток воды поступает в полусферический кавитатор 6, где скорость потока достигает критической величины, при которой начинается кавитация. Уравнение Бернулли позволяет рассчитать величину критической скорости [3,4,5]. За кавитатором образуется парогазовая каверна 8. Механизм обтекания жидкостью твердого тела (кавитатора) с образованием за ним каверны можно объяснить следующим образом [3]. Частицы движущейся жидкости массой m попадают в узкий зазор между дросселем и кавитатором, где трубки тока жидкости сужаются, скорость потока увеличивается, а статическое давление уменьшается до критического, при котором начинается кавитация. Здесь эти частицы движутся с ускорением a . Под действием силы $F=ma$ частицы жидкости, соприкасающиеся с твердым телом, вынуждены "расступиться", образуя в местах с растворенными микро-пузырьками воздуха газовую полость – каверну.

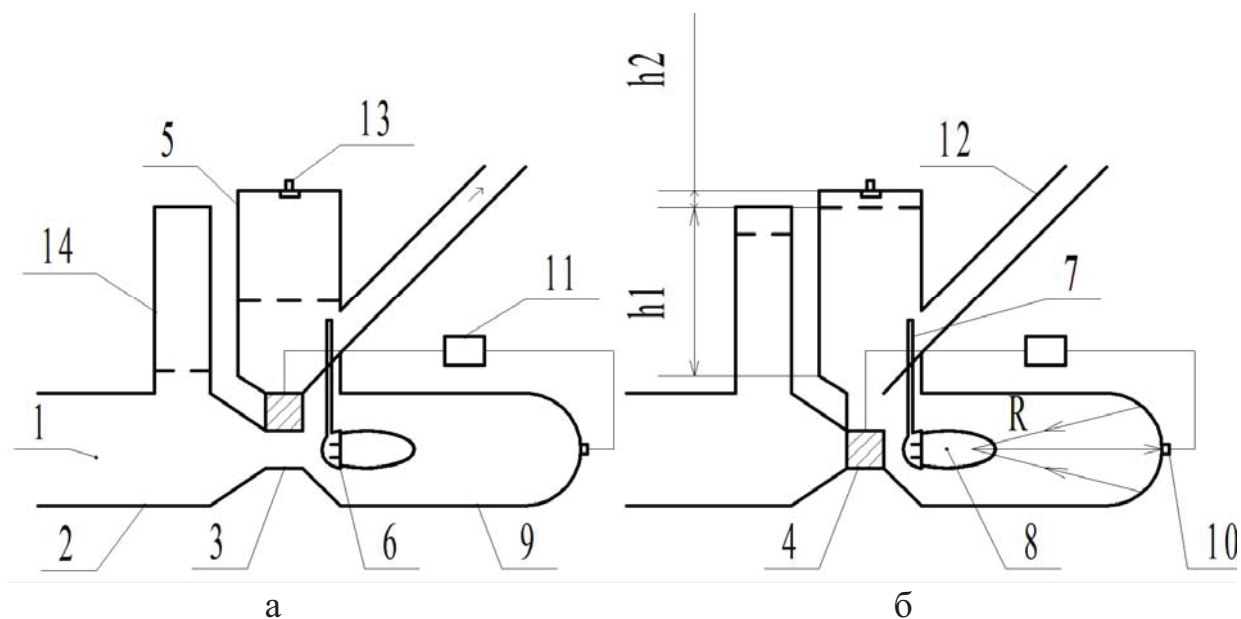


Рис.1. Принципиальная блок-схема теплогенератора-гидротарана в разрезе:
 а – режим кавитации; б – режим тепловыделения. 1 – входной поток воды;
 2 – входная труба; 3 – дроссель; 4 – клапан-прерыватель потока; 5 – бак-конденсор;
 6 – кавитатор с отверстиями для воздуха; 7 – трубка подачи воздуха; 8 – каверна;
 9 – гидроударная труба; 10 – датчик давления; 11 – исполнительный механизм;
 12 – выходная труба; 13 – клапан избыточного давления пара; 14 – уравниватель емкости

Для увеличения количества микро-пузырьков воздуха, а, следовательно, для увеличения объема каверны, через узкие отверстия в боковой сферической поверхности кавитатора, самотоком по трубке 7 в область низкого давления поступает воздух, т. е. создается дополнительная вентиляция (или искусственная кавитация). Каверна будет увеличиваться в размерах до тех пор, пока в удаленных точках потока, где статическое давление больше критического, силы давления не уравновесят силу F . Возникающие движения жидкости приводит к расширению объема каверны до ее наибольшего значения - миделя. Известно [2], что при одинаковых числах кавитации естественные и искусственные каверны полностью идентичны. Поэтому при их схлопывании выделяется примерно одинаковое количество тепла.

Рассмотрим теперь механизм разрушения каверны ударной волной. Поток воды доходит до конца трубы 9. Здесь, в результате торможения потока, создается гидравлический удар, при котором давление в конце трубы повышается на величину

$$\Delta p = \rho Vc \tag{7}$$

где ρ – плотность жидкости;

V – скорость потока, $c = 1530$ м/с – скорость образующейся ударной волны, равная скорости звука в воде.

Конец трубы 9 имеет форму дуги, радиус которой равен расстоянию до центра каверны (R на рис 1.б). Отраженные от всех точек конца трубы ударные волны, распространяясь со скоростью C , будут одновременно воздействовать на центр каверны. В результате наложения ударных волн в центре каверны интенсивность волны а, следовательно, и давление возрастет. При скорости потока в трубе 9 равной 4 м/с ударное давление (7) составит 60 атм, а, учитывая наложение отраженных волн в центре каверны, давление повысится многократно, что приведет к быстрому схлопыванию каверны. Схлопывание каверны, образованной возле твердой поверхности (кавитатора) приводит к формированию узкой

струи высокого давления [1, 2, 4], которая, распространяясь внутрь каверны, завершит ее разрушение. Возникающая при схлопывании каверны ударная волна, разрушит все оставшиеся кавитационные пузыри. В результате схлопывания каверны и пузырей выделиться большое количество тепла. В момент времени, когда давление в конце трубы 9 возрастет на величину Δp (7), датчик давления 10 включит исполнительный механизм 11. Последний переместит клапан 4 в нижнее положение (рис. 1б) закрывая дроссель 3 и открывая бак-конденсор 5. В бак под давлением отраженной от трубы 9 ударной волны поступит горячая вода и поднимется на высоту h_1 . В верхней части бака установится давление парогазовой смеси:

$$P_T = \rho_T g h_2, \quad (8)$$

где ρ_T – плотность;

h_2 – высота столба сжатого газа в баке 5.

В нижней части бака давление столба воды составит

$$P_B = \rho_B g h_1, \quad (9)$$

где ρ_B – плотность воды в баке.

В баке-конденсоре осуществляется конденсация насыщенного пара, поступившего вместе с водой из трубы 9. В верхней части бака 5 установлен клапан предельного давления 13, сбрасывающий избыточное давление парогазовой смеси. Когда давление столба воды и пара в баке поднимется до величины

$$P = P_T + P_B, \quad (10)$$

горячая вода поступит по трубе 12 в теплосеть к потребителям тепла. Давление (10) рассчитывается так, чтобы его величина была достаточной для подъема горячей воды по трубе 12 на необходимую высоту и транспортировки ее к потребителям тепла.

В момент разрушения каверны давление в конце трубы 9 уменьшится на величину Δp (7). Датчик 10 зафиксирует значительное понижение давления и приведет в действие исполнительный механизм, который переместит клапан 4 в верхнее положение, показанное на рис. 1а. Для предотвращения гидравлического удара в трубе 2, который мог бы произойти к моменту открытия клапана 4, в конце трубы устанавливается уравнивательная емкость 14. Во время прерывания входного потока клапаном 4 вода поступает в уравнивательную емкость, снижение давления на входе дросселя 3. Давление на его входе повысится всего на величину P_B (9), что приведет к небольшому увеличению скорости потока воды в момент открытия дросселя, т.е. к началу второго цикла работы теплогенератора. В дальнейшем работа теплогенератора повторяется.

Бак-конденсор 5 используется не только для конденсации пара и накопления горячей воды, но и для подъема и транспортировки ее к потребителям, т.е. выполняются функции гидротарана. Это позволяет отказаться от использования в теплосети сетевых насосов. Замкнутый цикл циркуляции воды, направляемой от потребителей на вход теплогенератора, дает возможность избежать лишних потерь тепла [5].

Разрушение каверны в теплогенераторе осуществляется в центре каверны ударной волной и центральной струей высокого давления. Это предотвращает возможность кавитационной эрозии теплогенератора. Кавитационной эрозии от микроструи высокого давления подвергается только плоская поверхность кавитатора. Однако поступление воздуха в эту область по трубе 7 значительно уменьшит кавитационную эрозию [4].

Если условия эксплуатации не позволяют использовать электроэнергию для работы исполнительного механизма (11) привода клапана, теплогенератор можно оборудовать двумя

клапанами, приводимыми в действие высоким давлением ударной волны. Принципиальная блок-схема такого теплогенератора показана на рис. 2.

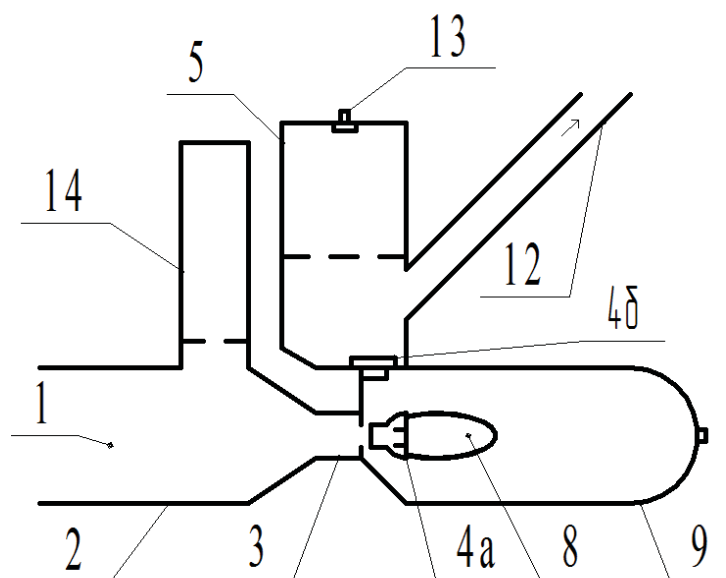


Рис. 2. Принципиальная блок-схема теплогенератора-гидротарана с двумя клапанами (4а, 4б), который работает от энергии движущегося потока воды 1. Цифровые обозначения соответствуют рис. 1. Трубка подачи воздуха не показана

В режиме гидроудара, когда давление в конце трубы 9 повышается на величину Δp (7) клапан 4а не испытывает высокого давления (нормально открыт) и выполняет функции кавитатора. Клапан 4б является нормально закрытым и открывается только под действием снизу высокого давления ударной волны. Через промежуток времени $t = R/c$ – полпериода ударной волны, последняя достигнет каверны и создаст высокое давление в левой части трубы. Клапан 4а закроется, а 4б-откроется и горячая вода поднимется в бак 5. В остальном работа этого генератора ничем не отличается от ранее описанного (см. рис. 1).

Генератор с двумя клапанами (рис. 2) использует для работы только кинетическую энергию потока воды. Поэтому такие генераторы могут найти применение в горной местности, для получения, подъема и транспортировки горячей воды из быстрых горных рек.

Расчет тепловой мощности генератора проводился с использованием соотношений (2, 3, 6) для гидроударной трубы длиной 2 м и диаметром 0,2 м, диаметром дросселя и кавитатора 10 см и скорости входного потока 4 м/с. Учитывался минимальный объем каверны (без вентиляции). Тепловая мощность составила примерно 300 кВт. С учетом дополнительного притока воздуха (вентиляции) мощность возрастет. Мощность также возрастет при увеличении скорости входного потока.

Выводы

Высокая энергоэффективность, экологическая чистота, многофункциональность, возможность отказаться от использования электродвигателей сетевых насосов и простота конструкции являются главными достоинствами рассмотренных теплогенераторов-гидротаранов. Подобные кавитационные теплогенераторы, используемые в домах, уже в ближайшем будущем должны полностью вытеснить малоэффективное и загрязняющее окружающую среду централизованное теплоснабжение, давно изжившее себя в связи с огромными тепловыми потерями, дороговизной выработки тепла и обслуживания теплосетей.

Список литературы

1. Brennen Christopher E. Cavitation and Bubble Dynamics. Oxford University Press, New York, Oxford, 1995, 282 p.

2. Kintel Michael P. Computational Techniques and Analysis of Cavitating-Fluid Flows. A Dissertation in Aerospace Engineering, 2008, 347 p.
3. Пирсол И. Кавитация. – М., изд. "Мир", 1975 г., 211 с.
4. Арзуманов Э. С. кавитация в местных гидравлических сопротивлениях. – М. изд. "Энергия", 1977 г., 153 с.
5. Нефедов Ю. И., Стороженко В. А., Брагин С. С. Кавитационный энергосберегающий теплогенератор-гидротаран. В ж. "Энергосбережение • Энергетика • Энергоаудит", 2011, № 5, С. 9–14.
6. Нефедов Ю. И., Стороженко В. А., Поляков Л. А. Энергосберегающий генератор тепла. В ж. "Энергосбережение • Энергетика • Энергоаудит", 2010, № 7, С. 8–12.

CAVITATION HYDROBLOW GENERATOR OF HEAT

Ju. I. NEFEDOV, Cand. Tech. Scie.
V. A. STOROZHENKO, D-r Scie. Tech., Pf.
S. S. BRAGIN

The correlation for computation of cavitation generator's heat power is found. Functioning of cavitation device as heat generator and hydraulic ram has been considered.

Поступила в редакцию 15.03 2012 г.
