

УДК 621.311

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 ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ ТЕПЛОГЕНЕРАТОР-ГИДРОТАРАН

В работе рассмотрено простое устройство для генерации и транспортировки тепловой воды, принцип действия которого основан на использовании гидравлического удара и кавитации жидкости при торможении. Данное устройство – теплогенератор-гидротаран приводится в действие кинетической энергией движущегося потока воды. Описана работа устройства, сделаны расчеты скорости потока при кавитации, температуры, давления и выделяемого количества тепла при разрушении кавитационных пузырей. Предложен метод расчета тепловой мощности кавитационного теплогенератора. Рассмотрена работа теплотрассы с теплогенератором. Предложено использовать теплогенераторы-гидротараны на реках с быстрым течением, где достигается наибольшее энергосбережение.

В роботі розглядається простий пристрій для утворення й транспортування теплої води. Принцип дії пристрою засновано на використанні гідравлічного удару і кавітації рідини при її гальмуванні. Даний пристрій-теплогенератор-гидротаран діє за рахунок кінетичної енергії потоку рідини. Розглянута робота пристрою, зроблені розрахунки швидкості потоку, при якій виникає кавітація, температури, тиску й кількості тепла, що створюються при руйнуванні кавітаційних бульбашок. Запропонована методика розрахунку теплової потужності теплогенератора. Розглянута робота тепло мережі, в якій використовується кавітаційний гідродарний теплогенератор. Запропоновано застосувати теплогенератори-гидротарани на річках з бистрою течією, де досягається найбільше енергозбереження.

Введение

Поиски экономичных и экологически чистых источников тепла, не требующих сжигания углеводородного топлива, привели к идее использования для получения тепловой энергии явления кавитации жидкости [1–4]. Физические механизмы получения кавитации разнообразны. Однако общим является то, что тепловая энергия высвобождается при быстром разрушении (схлопывании) кавитационных пузырьков воздуха и пара. Вопросы, связанные с выделением тепла при кавитации, мало изучены. Поэтому в литературных источниках не приводятся расчеты основных характеристик кавитационных теплогенераторов: скорости потока жидкости при кавитации, ее температуры и давления, а так же тепловой мощности генератора. Описываемые теплогенераторы имеют сложную конструкцию и не высокую теплоотдачу, что ограничивает их широкое применение.

Особый интерес представляет использование при разработке теплогенераторов явления кавитации при гидравлическом ударе, который приводит к значительным изменениям давления и температуры жидкости, а, следовательно, и к высокой теплоотдаче. В данной работе рассмотрен конструктивно простой кавитационный гидроударный генератор тепла. Проведен расчет его основных характеристик: скорости потока жидкости при кавитации, давления, температуры и тепловой мощности. Показаны возможности и преимущества его использования в тепловых сетях.

Основная часть

1. Физический механизм теплообразования

Гидравлический удар создается в трубопроводе при внезапном изменении скорости движения жидкости, например, вследствие торможения потока. В месте внезапного торможения возникает избыточное давление, вызванное продолжающимся до места остановки движением жидкости. Из-за несжимаемости жидкости это избыточное ударное

давление ΔP может превышать давление P при стационарном течении во много раз. Ударное давление ΔP приводит к уменьшению давления в местах трубопровода до места торможения. В результате этого жидкость начнет двигаться из области повышенного давления (в месте торможения) в область пониженного давления, где через некоторое время давление повышается. Таким образом, в трубе создается ударная волна. Фронт ударной волны распространяется со скоростью звука в жидкости. Для воды она составляет $c = 1425 \text{ м/с}$. Величина ударного давления зависит от плотности ρ жидкости, скорости стационарного потока v и скорости ударной волны c [5–7]:

$$\Delta P = \rho v c.$$

При сравнительно небольшой скорости потока $v=1 \text{ м/с}$, ударное давление воды составит $\Delta P=14,25 \cdot 10^5 \text{ Па}$, что соответствует приблизительно 14 атм. Найдем минимальную скорость потока, при которой будет возникать кавитация в области пониженного давления $P - \Delta P$. Для этого запишем уравнение Бернулли для двух точек линии тока в горизонтальной трубе: точки невозмущенного стационарного потока, движущегося со скоростью $v=1 \text{ м/с}$, и точки области пониженного давления, где скорость потока примем равной минимальной скорости кавитации $v_{k \text{ min}}$:

$$P + \frac{\rho v^2}{2} = (P - \Delta P) + \frac{\rho v_{k \text{ min}}^2}{2}, \quad (1)$$

Из этого соотношения найдем $v_{k \text{ min}}$:

$$v_{k \text{ min}} = \sqrt{\frac{\rho v^2 + 2\Delta P}{\rho}}. \quad (2)$$

Подставляя численные данные, получим $v_{k \text{ min}} = 53,3 \text{ м/с}$. Скорость перемещения фронта ударной волны почти в 27 раз превышает минимальную скорость, при которой начнется кавитация. Поэтому кавитация будет иметь место не только при давлении фронта пониженного давления $P - \Delta P$, но и в соседних областях с большим давлением. Соотношение (2) позволяет определить границы области потока, вовлеченной в кавитационный процесс, зная, как изменяется давление на разном расстоянии от фронта. Известно [5, 6], что форма ударной волны близка к синусоидальной. Эти данные, включая скорость стационарного потока, надо учитывать при расчете объема воды, вовлеченной в кавитационный процесс. Кавитация наступает, когда давление в жидкости становится равным давлению насыщенных паров P_n при данной температуре. При температуре $t = 20^\circ\text{C}$ это давление составляет $P = 2,33 \cdot 10^3 \text{ Па}$.

Маленькие пузырьки воздуха, растворенного в воде, при таком внутреннем давлении быстро увеличиваются в размерах и, под действием выталкивающей силы, перемещаются вверх. Попадая в область повышенного давления, пузырьки быстро разрушаются (схлопываются), оставляя после себя очень маленькие пузырьки – «зародыши» новых кавитационных пузырей. Схлопывание пузырька происходит очень быстро. Время схлопывания по разным оценкам составляет от 0,1 мс до 1 мкс. При гидравлическом ударе схлопывание осуществляется вследствие перемещения фронта повышенного давления ударной волны в область кавитации (область пониженного давления) и сопровождается значительным увеличением давления (до сотен атмосфер) и температуры (тысячи градусов) в месте схлопывания [6]. Механизм схлопывания объясняют разрывом свободной поверхности жидкости по всей поверхности пузырька за счет увеличения объема жидкости и, как следствие, потерю поверхностной энергии и энергии взаимодействия молекул в местах разрыва жидкости. Если схлопывание происходит на поверхности твердого тела, выделяемая энергия может разрушить его или привести к эрозии поверхности [5, 6].

Время схлопывания пузырька очень мало, поэтому процесс схлопывания можно считать адиабатным. Используя второе уравнение Пуассона [8] для адиабатного процесса можно определить локальную температуру в микрообъеме после схлопывания:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\gamma-1} \quad (3)$$

В выражении (3) T_1 – начальная температура (например 293K), V – объем пузыря в момент схлопывания, V_0 – объем «зародыша» кавитационного пузыря после схлопывания, γ – отношение молярных теплоемкостей C_p/C_v , равное для паров воды 1,33. Для кавитационного пузыря радиусом $r = 0,5 \text{ мм}$ и «зародыша» радиусом $r_0 = 0,05 \text{ мм}$, локальная температура (3) воды в месте схлопывания составит $T_2 = 2590^\circ\text{C}$. Данная температура нагревает микрообласть радиусом $r_0 = 0,05 \text{ мм}$ и, поэтому тепло быстро рассеивается. Если же плотность кавитационных пузырей велика, то будет иметь место существенный нагрев воды.

Определим количество тепла Q , выделяемого при схлопывании одного пузыря. Для адиабатного процесса Q будет равно работе при адиабатном сжатии пара в пузыре [8]:

$$Q = \frac{m}{\mu} C_V (T_2 - T_1), \quad (4)$$

где m – масса насыщенного пара в пузыре;

μ – молярная масса пара при начальной температуре T_1 , $C_V = \frac{1}{2} R = 3 \cdot 8,31 = 24,9 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$

молярная теплоемкость пара при постоянном давлении.

Массу пара в пузыре $m = \rho V$ определим по плотности ρ насыщенного пара при температуре 20°C ($\rho = 17,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$) и объему пузыря $V = 0,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$.

Подстановка численных данных в формулу (4) даёт значение количества тепла $Q = 1,45 \text{ мДж}$, выделяемого при схлопывании одного пузыря радиусом $0,5 \text{ мм}$.

Тепловую мощность кавитационного теплогенератора можно определить, зная средний коэффициент η генерации пузырей за 1 секунду в 1 м^3 и объем V_k области генератора, в которой имеет место кавитация, из соотношения:

$$P = Q \eta V_k \quad (5)$$

Объем V_k определяется, исходя из конструктивных данных генератора, учитывается давление в данном объеме, которое должно быть меньше или равно давлению насыщенных паров в пузыре. Определение коэффициента генерации η кавитационных пузырей является важной задачей будущих экспериментальных исследований. По предварительной оценке, основанной на расчетах и экспериментальных данных [5,6], учитывающих малое время «рождения» и схлопывания пузырей ($\tau = 1 \text{ мкс}$), количество пузырей, генерируемых за 1 сек. в 1 м^3 может достигнуть, при интенсивной кавитации, $10^{10} \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-3}$ и более.

Найдем величину локального давления P , создаваемого при схлопывании одного пузыря. Для этого воспользуемся первым уравнением Пуассона для адиабатного процесса [8]:

$$PV^\gamma = \text{const.} \quad (6)$$

Если обозначить начальное давление P_n – давление насыщенных паров при заданной температуре, конечное давление P , объем «зародыша» V_0 , а объем кавитационного пузыря V , то из соотношения (6), получим:

$$P = P_n \left(\frac{V}{V_0} \right)^\gamma \quad (7)$$

Подстановка указанных ранее значений (при $t = 20^\circ\text{C}$) дает величину давления $P = 227,6 \cdot 10^5 \text{ Па}$ что приблизительно равно 227 атмосфер. Данное давление и температура микрообъема при схлопывании пузыря соответствуют экспериментальным данным [1,7].

2. Принцип действия кавитационного генератора

Принцип работы кавитационного гидротаранного генератора тепла поясняется при помощи блок-схемы, изображенной на рис. 1.

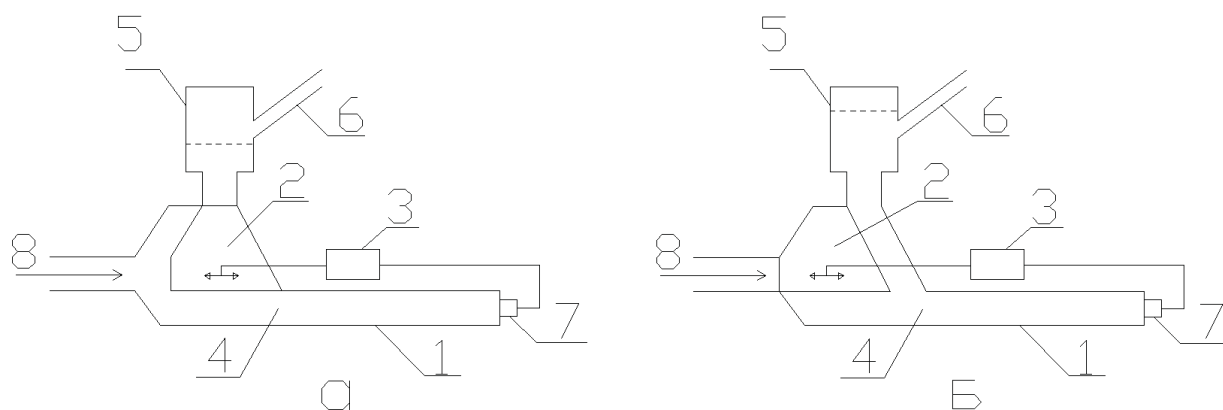


Рис.1. Принципиальная блок-схема теплогенератора-гидротарана:

а – режим гидроудара; б – режим тепловыделения;

1 – гидроударная труба; 2 – переключающий клапан; 3 – исполнительное устройство привода клапана; 4 – область образования кавитационных пузырей; 5 – воздушный колпак; 6 – труба подъема воды; 7 – датчик давления, установленный в месте возникновения гидроудара; 8 – входящий поток воды

Поток воды 8 с небольшой скоростью (примерно 1 м/с) поступает в трубу 1 (рис. 1а), доходит до ее конца 7, где, создается ударное давление ΔP . Все это время, трапециевидный клапан 2 своей верхней частью прерывает проход воды в воздушный колпак 5. Вследствие гидравлического удара, через малый промежуток времени в конце трубы давление повышается до значения $P + \Delta P$, т. е. увеличивается по сравнению с начальным давлением P в трубе на ΔP . Датчик давления, расположенный в конце трубы (точке 7), фиксирует значительное повышение давления и выдает электрический сигнал на включение исполнительного механизма 3, перемещающего клапан 2 в положение, показанное на рис. 1б. Поступление в трубу 1 входного потока 8 прекращается. В области трубы 4 давление понижается. Фронт ударной волны со скоростью звука в воде (1425 м/с) переместится в область пониженного давления 4 и направит поток воды в воздушный колпак 5, где давление увеличивается. В конце трубы (где расположен датчик давления 7) давление уменьшается ($\Delta P \approx 14 \text{ атм}$) и создается вакуум. Датчик 7 фиксирует понижение давления, а исполнительный механизм 3 по данному сигналу перемещает клапан 2 в начальное положение (рис. 1а). Поток воды 8 устремляется в область пониженного давления, создавая ударную волну. Через малый промежуток времени давление в конце трубы повышается, а в области 4 понижается и за увеличения скорости потока. Здесь начинается кипение жидкости при низкой температуре (кавитация). Давление фронта ударной волны в конце трубы фиксируется датчиком 7, а исполнительный механизм перемещает клапан 2 в положение (рис. 1б) и прерывает поток 8. Далее фронт ударной волны перемещается в область 4 пониженного давления, где пузырьки схлопываются, выделяя тепло, а теплая вода поступает в колпак 5. Давление в воздушном колпаке 5 создается сжатым воздухом. Оно меньше давления фронта ударной волны, но достаточно, чтобы поднять воду по трубе 6 на большую высоту. Далее весь процесс повторится. Таким образом, описанный гидроударный генератор тепла, дополнительно может выполнять функции гидротарана, использующего энергию входного потока воды для ее подъема на высоту. Простые расчеты показали [7], что гидротаран с длиной трубы 12 м и диаметром $0,2 \text{ м}$ при скорости входного потока 4 м/с и частоте срабатывания клапанов $0,5 \text{ Гц}$, способен за 1 час поднять на высоту 30 м 3 м^3 воды. Рассмотренный выше гидроударный генератор, может поднять за тоже время такой же объем нагретой воды. Входной поток может создаваться как насосом, так и течением ручья или реки.

Оценим возможную тепловую мощность (5) гидроударного генератора с данными, приведенными ранее. В трубе 1 длиной 2 м и диаметром $0,2 \text{ м}$ область пониженного

давления при скорости потока $v = 1 \text{ м/с}$ по расчету может составлять $l \approx 0,5 \text{ м}$. При такой длине области кавитации, ее объем составит $V = 1,57 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$. Количество тепла, выделяемого при схлопывании одного кавитационного пузыря, используем найденное выше $Q = 1,45 \cdot 10^3 \text{ Дж}$. Возьмем среднее значение коэффициента генерации пузырей за 1сек в $1 \text{ м}^3 \mu = 10^8 \text{ с}^{-1} \text{ м}^{-3}$. Тогда, найденная по формуле (5), тепловая мощность кавитационного генератора составит $P = 2,28 \text{ кВт}$. Увеличение скорости входного потока может привести к увеличению значения μ и V , а значит и к повышению мощности генератора.

В области кавитации 4 трубы 1 может иметь место схлопывание пузырей на рабочих поверхностях трубы 1 и клапана 2, а также в колпаке 5. Это может привести к возникновению кавитационной эрозии (кавитационных каверн) на данных поверхностях.

Для борьбы с кавитационной эрозией применяют кремнийорганическое покрытие КНН-121 [1], которое способствует смачиванию поверхностей. В результате такого покрытия всех рабочих поверхностей, генератора в зонах возможного схлопывания пузырей, движущаяся жидкость и пузыри, будут проскальзывать вдоль этих поверхностей, что исключит их эрозию.

3. Кавитационный генератор тепла с замкнутым циклом

Боле эффективный нагрев воды будет иметь место при замкнутом цикле циркуляции воды в генераторе, включающем потребителей тепла. Блок-схема тепловой установки с замкнутым циклом показана на рис. 2.

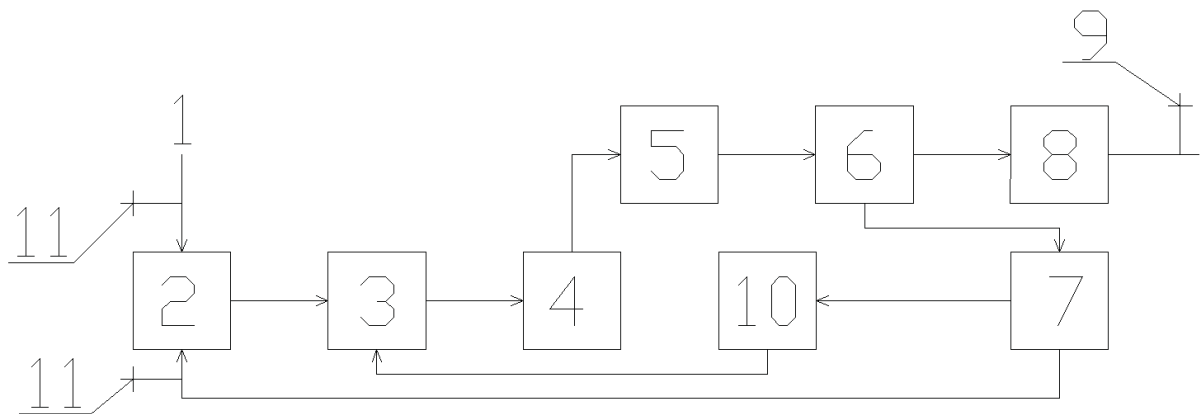


Рис.2 Блок-схема тепловой сети с кавитационным теплогенератором:

- 1 – входной поток холодной воды; 2 – смесительный бак; 3 – насос подачи;
- 4 – кавитационный теплогенератор; 5 –сетевой насос (насос прокачки);
- 6 – потребители тепла (тепловые приборы); 7 – расширительный бак; 8 – бак выпуска газо-водяной смеси; 9,11 – вентили; 10 –регулятор скорости потока

Холодная вода 1 поступает в смесительный бак 2, из которого насос подачи 3 подает воду с определенной скоростью потока в кавитационную трубу теплогенератора 4. Из кавитационного теплогенератора нагретая вода насосом прокачки 5 подается к потребителям тепла (тепловым приборам) 6. Далее вода поступает в бак 8 выпуска газо-водяной смеси для устранения (с помощью вентилля 9) воздушных пробок в теплосети. После потребителей, охлажденная, но еще теплая вода, подается в расширительный бак 7, уравнивающий давление воды в теплосети, откуда поступает в смесительный бак 2 и в систему регулирования скорости потока 10. В регуляторе 10 измеряется температура и давление охлажденной воды и формируется, в соответствии с соотношением (2), управляющий сигнал для изменения угловой скорости вращения насоса подачи, который изменяет скорость подачи воды в теплогенератор так, чтобы поддерживалась необходимая температура воды в теплосети. Вентили 11 регулируют поступление холодной и горячей воды

в смесительный бак. При отсутствии потерь теплой воды в теплосети, вентиль, подающий холодную воду 1, закрывают. Циркуляция в теплосети теплой воды позволит более эффективно, с меньшими затратами энергии нагревать воду в кавитационном теплогенераторе и исключит лишние потери тепла.

Выводы

Достоинством рассмотренного кавитационного гидроударного генератора тепла является простота конструкции. В генераторе не используются вращающиеся элементы, в отличие от других кавитационных генераторов. Генератор приводится в действие кинетической энергией потока воды, не требует сжигания дефицитного органического топлива, а электроэнергия используется только для переключения клапана. Точный расчет тепловой мощности, вырабатываемой таким генератором, является сложной задачей, требующей экспериментальных данных. Для этого планируется создать на базе данной разработки кавитационный гидроударный генератор небольшой мощности. Законы гидродинамического и термодинамического подобия позволяют, по полученным на уменьшенной модели данным, рассчитать и построить кавитационный гидроударный теплогенератор любой нужной мощности.

Генераторы малой мощности с гидротаранным устройством могут найти применение в горной местности для нагревания и подъема воды из быстрых горных рек. Гидроударные кавитационные генераторы, используя для работы главным образом кинетическую энергию потока воды, экономически эффективны и не загрязняют окружающую среду. Поэтому такие теплогенераторы могут найти широкое применение уже в ближайшем будущем.

Список литературы

1. Пищенко Л. И., Меренков Ю. А. Кавитационный тепловой генератор. Патент Российской Федерации от 14.04 1997 г., бюл. № 7.
2. Корсаков А. И. Способ получения энергии, устройство для ее получения и система управления устройством. Патент RU№2280823 от 10.08 2004 г.
3. Способ получения энергии. Патент RU№20544604, опублик. 20.02 1996 г., бюл. № 5
4. Нефедов Ю. И., Стороженко В. А., Поляков Л. А. Энергосберегающий генератор тепла. В ж. "Энергосбережение· Энергетика· Энергоаудит", 2010, № 7, – С. 8–13.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика / Гидродинамика, том 4/; М., Физматлит, 2001 г.
6. Пирсол И. Кавитация. -М., изд."Мир", 1975 г..
7. Нефедов Ю. И., Стороженко В. О. Гідрогазодинаміка. – Навч. посіб., Харків ХНУРЕ, 2011.
8. Воловик П. М. Фізика для університетів. – Київ: Перун, 2005 г.

CAVITATIONAL ENERGY-CONSERVING HEAT GENERATOR AND HYDRAULIC RAM

Yu. I. NEFEDOV, Cand. Tech. Scie, associate professor
V. A. STOROGENKO, D-r Scie. Tech., Pf.
S. S. BRAGIN

It is considered in the article a device for getting and transportation of hot water. In working of the device hydraulic blow and cavitation of liquid with deceleration are used. Calculations of speed of water flow at cavitation, temperature, pressure and heat power of the device are given; its work as heat generator and hydraulic ram is described.

Поступила в редакцию 04.04 2011 г.