

УДК 621.

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

С. С. БРАГИН

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, г. Харьков

## ГИДРОУДАРНЫЙ КАВИТАЦИОННЫЙ ТЕПЛОГЕНЕРАТОР И ВОДОПОДЪЕМНОЕ УСТРОЙСТВО

*Рассматривается модификация гидротаранной установки, выполняющей функции кавитационного теплогенератора и водоподъемного устройства. Для этого в рабочей трубе гидротарана создается торможение потока воды на входе и в конце трубы. Кратковременное торможение воды на входе трубы позволяет создать большую скорость разгонного потока, достаточную для образования внутри трубы кавитационной паровой каверны большого объема. Гидроудар в конце трубы создаёт отраженную ударную волну высокого давления, разрушающую кавитационные образования. Нагреваемая при этом вода подаётся в воздушный колпак и далее под большим давлением поднимается к потребителю. Высокая скорость разгонного потока позволяет примерно в 10 раз сократить длительность одного цикла работы гидротарана, что приводит к увеличению его производительности и созданию большой тепловой мощности.*

*Розглядається модифікація гідравлічного таранного пристрою, який виконує функції кавітаційного генератора тепла і водопідіймача. Для цього в робочій трубі гідротарана створюється гальмування потоку при вході і в кінці труби. Миттєве гальмування води при вході дозволяє зробити високу швидкість розгінного потоку, яка достатня для створення посеред труби кавітаційної парової каверни великого об'єму. Гідроудар у кінці труби здійснює ударну хвилю високого тиску, яка відбивається і далі руйнує кавітаційні відтворення. Нагріта при цьому вода подається в повітряний ковпак і далі під високим тиском підіймається к споживачу. Висока швидкість розгінного потоку дозволяє приблизно у 10 разів скоротити тривалість одного циклу роботи гідротарана, що приводить к збільшенню його працездатності й створенню великої теплової потужності.*

### Введение

Обычный гидравлический таран – это водоподъемное устройство, в котором для подачи воды используется энергия гидравлического удара [1]. Гидравлический удар возникает при быстром перекрытии или торможении потока жидкости в трубопроводе запорным устройством и сопровождается резким повышением давления потока. Энергию гидроудара в гидротаране можно использовать не только для подъема жидкости, но и для ее кавитационного нагревания. Это позволит создать установку для нагревания и транспортировки воды, работающую исключительно на энергии потока и энергии связи кластеров, молекул и атомов воды. Известные применения гидротаранов для этих целей [2,3] предполагают использование электрических управляющих устройств, электродвигателей или обладают низкой производительностью и тепловой мощностью. Указанные недостатки можно исключить, если создать торможение потока воды в рабочей трубе гидротарана не только в конце трубы, но и на ее входе.

### Устройство и принцип работы гидротаранного теплогенератора

Принципиальная блок-схема гидротаранного теплогенератора в разрезе показана на рис. 1.

Отличительной особенностью рассматриваемого гидротаранного тепло генератора является применение в нем клапана 3 - прерывателя поток, соединенного жесткой связью 11 с нагнетательным клапаном 7, и использование полусферического кавитатора 5, предназначенного для образования кавитационной парогазовой каверны 13. Последняя образуется в результате значительного увеличения скорости обтекающего кавитатор

разгонного потока воды после открытия клапана-прерывателя 3, т.е. после гидроудара, возникающего при кратковременном закрытии клапана 3 (см. рис. 1).

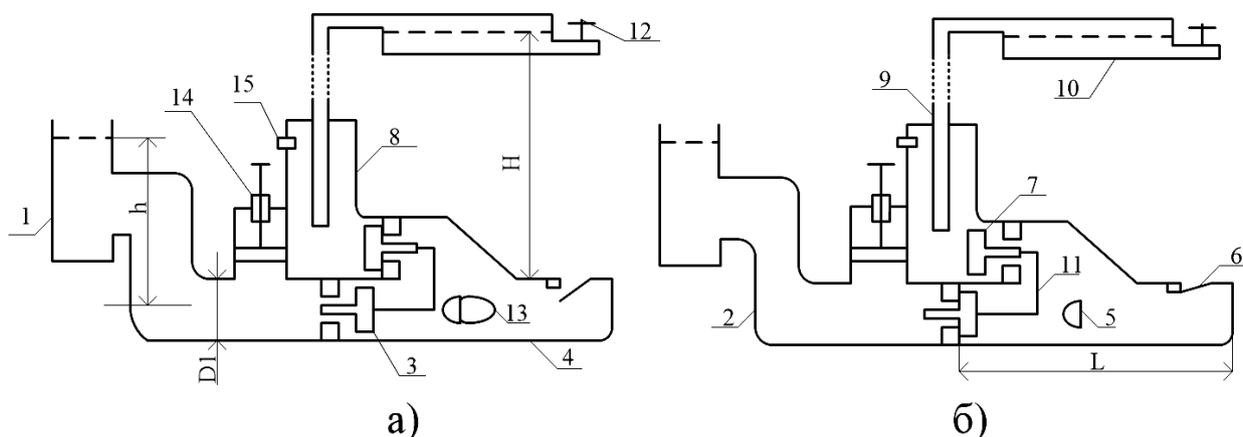


Рис. 1. Блок-схема гидротарана-теплогенератора в разрезе:

а) – режим разгона и кавитации; б) – режим тепловыделения.

- 1–питающий резервуар, 2–трубопровод, 3–клапан-прерыватель потока, 4–труба гидротарана, 5–полусферический кавитатор, 6–ударный клапан, 7–нагнетательный клапан, 8–воздушный колпак, 9–трубопровод горячей воды, 10–принимающий резервуар, 11–жесткое соединение, 12–кран потребителя, 13–каверна, 14–регулирующая емкость, 15–клапан избыточного давления

Рассмотрим последовательно работу устройства. Принимающий резервуар (бассейн) 1 предназначен для непрерывного питания водой данного устройства из водоема, удаления из воды пузырьков воздуха и механических примесей и поддержания постоянного питающего напора  $h$ , который обеспечивает постоянную скорость воды в рабочей трубе гидротарана 4 при открытом клапане 3, т. е. начальный разогнанный поток, и создает первый гидроудар в конце рабочей трубы. Питающий напор  $h$  создает так же кратковременный гидроудар в начале трубы 4 при закрытом клапане 3. Гидротаран может продуктивно работать при питающем напоре  $h \geq 1\text{м}$ . С увеличением  $h$  возрастает и скорость разгонного потока, а, следовательно, и производительность устройства: расход воды, высота подъема, тепловая мощность и масса горячей воды, доставляемой к потребителю. В начале работы устройства поток воды из питающего резервуара 1 по трубопроводу 2 через открытый клапан 3 движется в рабочей трубе 4 частично выливаясь из открытого ударного клапана 6, создавая в конце трубы повышенное давление гидроудара (рис. 1а.) [4]:

$$P = \rho v c, \tag{1}$$

где  $\rho$  – плотность воды;

$v$  – средняя скорость разгонного потока в трубе 4;

$c$  – скорость распространения ударной волны ( $c \approx 1333 \text{ м/с}$ ).

Средняя скорость разгонного потока в первом цикле работы устройства невелика ( $1-3 \text{ м/с}$ ), однако после кратковременного гидроудара, возникающего при закрытом клапане-прерывателе 3, скорость разгонного потока возрастает примерно в 10 раз. Начальное давление ударной волны будет превышать  $10^6 \text{ Па}$ . Отраженная от правого конца трубы 4 ударная волна, двигаясь с большой скоростью в обратном направлении, высоким давлением закрывает ударный клапан 6, прекращая выход воды из системы. Продолжая свое движение в трубе 4, отраженная ударная волна доходит до клапана-прерывателя 3 и закрывает его, одновременно открывая нагнетательный клапан 7, так как клапан 3 и 7 жестко связаны между собой. Через открытый нагнетательный клапан 7 поток еще холодной воды заходит в воздушный колпак 8, создавая в верхней его части высокое воздушное давление. Под

действием этого давления закрывается клапан 7 и вода по трубопроводу 8 поднимается в принимающий резервуар 10.

Весь промежуток времени, в течение которого нагнетательный клапан 7 был открыт и вода поступала в воздушный колпак, клапан-прерыватель 3 находится в закрытом состоянии, что приводит к кратковременному повышению давления входного потока в месте его торможения. Известно [1], что внезапное кратковременное уменьшение скорости потока в гладких трубах с  $1 \text{ м/с}$  до нуля, увеличивает давление в месте торможения примерно на 10 атмосфер (примерно  $10^6 \text{ Па}$ ). Учитывая такое увеличение давления, нетрудно, воспользовавшись уравнением Бернулли, рассчитать скорость потока, проходящего через открывшейся клапан- прерыватель 3. Эта скорость составит  $v = 31 \text{ м/с}$  и будет превышать критическое значение, при котором начинается кавитация (число кавитации  $k = 0,3$ ). Важно отметить, что клапан прерыватель 3 закрывается на очень короткий промежуток времени (примерно  $0,02 \text{ с}$ ) и начальная скорость входного потока невелика, поэтому у закрытого клапана 3 не создается полноценного сжатия воды и ударная волна распространяет ее со скоростью  $v$ , меньшей скорости звука в воде [1, 4, 7]. Для регулирования скорости повторного разгонного потока, перед клапаном 3 устанавливается регулирующая емкость, которая принимает часть тормозящегося потока, уменьшая его скорость в момент открытия клапана 3. Подобные меры предпринимаются в гидравлике [4], где для гашения гидроудара используется уравнительные емкости. Изменение объема регулирующей емкости при перемещении в ней поршня, позволяет изменить скорость разгонного потока в момент открытия клапана-прерывателя и тем самым регулировать выходные параметры гидравлического теплогенератора.

После момента открытия клапана 3, скоростной разгонный поток обтекает в трубе полусферический кавитатор 5, за которым образуется большая каверна 13 эллипсоидной формы. Механизм обтекания жидкостью твердого тела (кавитатора) с образованием за ним парогазовой каверны можно объяснить следующим образом [5]. Частицы жидкости массой  $m$  со скоростью близкой к критическому значению (при котором начинается кавитация) при соприкосновении с твердым телом в местах отрыва от кавитатора под действием сил трения испытывают действие сил растяжения, двигаясь с ускорением. Здесь эти частицы вынуждены "растутиться". Другими словами жидкость на изломах кавитатора теряет свою сплошность свойства, образуя в местах с растворенными микро-пузырьками воздуха парогазовую полость-каверну. Ускоряющееся движение жидкости за кавитатором приводит к расширению объема каверны до ее наибольшего значения-миделя. Давление внутри каверны низкое и, как правило, равно давлению насыщенных паров при данной температуре. Так, например, при  $40^\circ \text{ С}$  давление насыщенных паров составляет  $P_k = 7,3 \cdot 10^3 \text{ Па}$ .

Перемещение фронта первой ударной волны в левую часть рабочей трубы 4 приводит к уменьшению до нуля давления в правой части трубы, т. е. к образованию так называемой зоны отрыва. Поэтому ударный клапан 6 открывается, создавая условия для интенсивного движения скоростного потока, возникающего после открытия клапана 3. Торможение скоростного потока в конце рабочей трубы приводит к созданию повторного гидроудара и отражению ударной волны. Фронт высокого давления отраженной ударной волны распространяется в область пониженного давления – в левую часть трубы 4 и разрушает (схлопывает) парогазовую каверну 13 (рис. 1б). В результате схлопывания каверны выделяется большое количество тепла и вода нагревается [3, 5]. Высокое давление ударной волны одновременно открывает нагнетательный клапан 7 и закрывает клапан-прерыватель 3. Далее уже горячая вода поступает в колпак 8, повышает в нем давление воздуха, которое, в свою очередь, закрывает клапан 7 и по трубопроводу 9 подает горячую воду в принимающий резервуар 10. Последний предназначен для накопления и расходования горячей воды. Одновременно с закрытием клапана 7 открывается клапан-прерыватель 3, создавая скоростной поток в трубе 4 гидротарана теплогенератора. Далее процессы образования каверны и нагрева воды многократно повторяются. Воздушный клапан избыточного

давления 15 предохраняет воздушный колпак 8 от разрушения при высоком давлении воздуха, уменьшая его.

### Расчет основных технических характеристик гидроударного теплогенератора

Главным входным параметром рассматриваемого гидроударного теплогенератора является тепловая мощность  $N$ . Для расчета  $N$  можно воспользоваться формулой [3, 6]:

$$N = E/T = \frac{(P-P_k)V_k}{T}, \quad (2)$$

в которой  $E$  полная тепловая энергия, выделяемая при разрыве всех кавитационных образований за время  $T$  одного цикла работы;

$P$  – давление воды у поверхности каверны в момент ее схлопывания,  $P_k$  – давление насыщенных паров и воздуха внутри каверны;

$V_k$  – объем каверны в момент схлопывания.

Давление  $P$  равно давлению фронта ударной волны, отраженной от конца рабочей трубы:

$$P = k\rho uc, \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент затухания давления ( $0 < k \leq 1$ ) при прохождении отраженной ударной волны от конца трубы 4 до каверны 13 (рис. 1);

$u$  – скорость разгонного потока в момент открытия клапана-прерывателя 3,

$c$  – скорость распространения ударной волны в воде.

Коэффициент затухание давления  $K$  определяет отношение давления ударной волны у поверхности каверны в момент схлопывания  $P_c$  к давлению отраженной волны  $P_{omp}$  во время отражения от конца рабочей трубы. Как показывает анализ известных данных [1],  $K$  для турбулентного потока примерно равен отношению квадратов скоростей в указанных выше точках потока. Для рабочей трубы диаметром  $D_l = 0,12$  м и длиной  $L = 2$  м можно принять  $K \approx 0,6$  [1]. Учитывая минимально возможные значения скоростей  $u = u_{kp} = 17$  м/с,  $c \approx 1000$  м/с по формуле (3) найдем давление:  $P = 10,2 \cdot 10^6$  Па. Расчет объема  $V_k$  каверны подробно рассмотрен в работах [5, 7] и определяется как объем не полного эллипсоида:

$$V_k = S_k l_k, \quad (4)$$

где  $S_k$  – наибольшая площадь поперечного сечения каверны;

$l_k$  – ее приведенная длина ( равная примерно 0,9 большой оси эллипсоида).

Площадь  $S_k$  для полусферического кавитатора определяется по формуле:

$$S_k = \frac{\sigma \pi D_2^2}{4(\sqrt{\sigma+1}-1)}, \quad (5)$$

Для полусферического кавитатора диаметром  $D_2 = 4$  см и числа кавитации  $\sigma = 0,3$  получим  $S_k = 2,68 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>. Отсюда наибольший диаметр каверны  $D_k = 5,8$  мм. Зная  $D_k$ , можно определить и приведенную длину каверны [5, 7]

$$l_k = \frac{2D_k}{\sqrt{\sigma}} = 0,21 \text{ м}. \quad (6)$$

Подставив найденные значения  $S_k$  и  $l_k$  в (4) получим объем каверны  $V_k = 0,56 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>.

Период  $T$  или время полного цикла работы гидроударного теплогенератора можно представить как сумму последовательных промежутков:

$$T = t_p + t_{обр} + t_n. \quad (7)$$

Здесь  $t_p$ -время разгона воды в рабочей трубе – от момента открытия клапана 3, создающего скоростной поток, до момента закрытия ударного клапана 6, т.е. до гидроудара в конце трубы. В свою очередь  $t_p$  складывается из времени движения скоростного потока в рабочей трубе  $L/u$  и времени  $t_6$  срабатывание ударного клапана 6:

$$t_p = \frac{L}{u} + t_6. \quad (8)$$

В соотношении (7)  $t_{обр}$  – время обратного хода ударной волны, т. е. промежуток времени от момента гидроудара в конце рабочей трубы до момента открытия нагнетательного клапана 7, включая время  $t_7$  его срабатывания:

$$t_{обр} = \frac{L}{c} + t_7. \quad (9)$$

Наконец  $t_H$  в выражении (7) – время нагнетания горячей воды в колпак, включает время  $t_7$  закрытия клапана 7. Одновременно открывается клапан-прерыватель 3. Время нагнетания  $t_H$  определим приближенно, считая что вода поднимается в колпак 8 на высоту  $h_1$ , со средней скоростью  $v_7=c/4$ , так как при подъеме испытывает увеличивающееся давление воздуха в колпаке. Поэтому:

$$t_H = \frac{h_1}{c/4} + t_7 \quad (10)$$

Принимаем  $L = 2м$ ,  $u = 17 м/с$ ,  $C = 1000 м/с$ ,  $h_1 = 0,5м$  и считая [1] что время срабатывания клапанов  $t_6 = t_7 = 0,02с$ , из соотношений (7–10) найдем длительность одного цикла:  $T = 0,182 с$ . Следует заметить, сто столь малое время периода работы гидротаранного теплогенератор стало возможным за счет высокой скорости разгонного потока, создаваемой кратковременным гидроударом у клапана-прерывателя 3, т. е. за счет малого времени разгона потока. Большое время разгона будет только во время первого цикла работы, когда вода движется по рабочей трубе 4 со скоростью, определяемой высотой напора  $h$ , а клапан прерыватель еще не закрывается отраженной ударной волной. Подставив все найденные значения в формулу (2), определим тепловую мощность гидротаранного теплогенератора:  $N = 31,4 квт$ . Важной характеристикой является производительность гидротаранного теплогенератора т. е. масса горячей воды доставляемой потребителю в принимающий резервуар за 1 секунду. Для этого надо определить массу воды  $m$ , подаваемую в воздушный колпак за время  $t_0$  открытого нагнетательного клапана ( $t_0 = h1/(c/4)$ ), объем закачиваемой воды и коэффициент потерь  $\delta$  на трение в проходном сечении ( $S_7 = 0,78 \cdot 10^{-2} м^2$ ) нагнетаемого клапана, в колпаке и в трубопроводе горячей воды 9. Учитывая известные данные [1, 4] о сопротивлении трению, можно оценить указанные потери при подъеме воды на высоту  $H = 5 м$  значением коэффициента  $\delta = 0,4$ , а массу  $m$  поступающей за один цикл воды по формуле:

$$m = \rho S_7 v_7 t_0 \delta.$$

Подстановка числовых значений дает величину  $m = 0,62 кг$ .

Определим производительность гидротаранного теплогенератора:

$$q = \frac{m}{T} = 3,4 \frac{кг}{с}.$$

Более точное значение всех найденных величин можно получить после проведения экспериментальных исследований на действующей установке.

### Выводы

Для работы данного кавитационного гидроударного теплогенератора достаточно потенциальной энергии напора питающего резервуара всего в 1 м. Нагревание и транспортировка воды осуществляется за счет использования энергии сжатой воды при гидроударе и энергии связи кластеров, молекул и атомов воды, высвобождаемой при разрушении кавитационных образований. Эта энергия может достигать очень больших значений и зависит в основном от разрушающего кавитационного образования давления [3, 6]. Все расчеты в данной работе выполнены с учетом минимальных значений параметров системы (давления, скорости и др.) В реальном устройстве тепловая мощность и производительность может намного превышать полученные величины. Однако и полученные выходные данные ( $P \approx 31,4 \text{ кВт}$ ;  $q = 3,4 \text{ кг/с}$ ) устройства могут удовлетворить потребности в горячем теплоснабжении небольшое фермерское хозяйство. При этом полностью отсутствует какие-либо энергозатраты на нагревание и транспортировку воды и не загрязняет окружающую среду.

В гидроударном теплогенераторе разрушение каверны осуществляется в середине потока, текущего в рабочей трубе. Это предотвращает возможность кавитационной эрозии стенок трубы и тем самым увеличивает срок эксплуатации генератора. Дешевизна и простота конструкции подобных генераторов позволит полностью вытеснить малоэффективное и загрязняющее окружающую среду централизованное теплоснабжение, давно изжившее себя в связи с огромными тепловыми потерями, дороговизной энергоносителей и обслуживания теплосетей.

### Список литературы

1. Овсепян В.М. Гидравлический таран и таранные установки. Теория, расчет и конструкции – М., изд. "Машиностроение", 1968 г., 123 с.
2. Патент российской федерации RU2374564 С1 от 01.2006
3. Нефедов Ю. И., Стороженко В. А., Брагин С. С. Кавитационный гидроударный генератор тепла. В ж. "Энергосбережение· Энергетика· Энергоаудит", 2012, № 4, С. 33–39.
4. Скворцов Л. С., Долгачев Ф. М. Викулин П. Д., Викулина В. Б. Гидравлика систем водоснабжения и водоотведения. – М., изд. "Архитектура-с", 2008 г., 255 с.
5. Присол И. Кавитация. – М., изд. "Мир", 1975 г., 211 с.
6. Brennen Christopher E. Cavitation and Bubble Dynamics. Oxford University Press, New York. Oxford, 1995, 282 p.
7. Г. Биркгоф, Э. Сарантонелло. Струи, следы и каверны. – М. изд. "Мир", 1964 г, 465 с. Hydroblow cavitation heat generator and water-lifting device.

### HYDROPERCUSSION CAVITATION HEAT GENERATOR AND WATER LIFTING DEVICE

Ju. I. NEFEDOV, Candidate of Engineering, Associate Professor  
S. S. BRAGIN

*The article describes the version of a hydraulic ram functioning as a cavitation heat generator and water lifting device. To that end, in the hydram drive pipe the water flow deceleration is provided at the inlet and at the end of the pipe. A short-time water deceleration at the pipe inlet enables to create a higher speed of the boost flow sufficient to form a large volume vapour cavity inside the pipe. The water hammer at the end of the pipe produces a high pressure reflected shock wave destroying cavitation formations. The water being heated in so doing is supplied in the air chamber, and then, under high pressure is lifted to the consumer. The high speed of the boost flow makes it possible to reduce approximately 10 times the duration of one working cycle of the hydram, which results in increasing its capacity and delivering a high heat output.*

Поступила в редакцию 14.03 2013 г.