

УДК 681.5:62-1

І.М. Федоткін, д-р техн. наук,

О.М. Тимонін, канд. техн. наук

Національний технічний університет України «КПІ»

А.В. Копиленко, канд. техн. наук.

Національний університет харчових технологій

ВИРОБЛЕННЯ ДОДАТКОВОЇ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ В КАВІТАЦІЙНИХ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРАХ ЗА РАХУНОК ГІДРАВЛІЧНОЇ НЕСТАЦІОНАРНОСТІ

Проведеними розрахунками показано, що можна отримувати додаткову дисипативну теплову енергію за рахунок залучення сил пружності за допомогою гідроударів, за рахунок залучення сил інерції за допомогою гідравлічних пульсацій та ін. В усіх цих випадках необхідною умовою є введення гідравлічної нестационарності.

Ключові слова: *кавітація, теплова енергія, нестационарність, гідроудар, гідравлічні пульсації.*

Для підсилення кавітаційного нагріву в теплогенераторах в роботах [1-7] розроблені різні методи фізичного впливу та встановлено нові фізичні ефекти, в тому числі, введення в процес гідродинамічної нестационарності шляхом генерації гідроударів, автоколивань та гідравлічних пульсацій.

© І.М. Федоткін, О.М. Тимонін, А.В. Копиленко, 2011

Як уже вказувалось у попередній статті, після досягнення радіальною швидкістю змикання оболонки бульбашки швидкості світла закон збереження енергії не діє, оскільки, згідно з представленою гіпотезою, виникає додаткова енергія за рахунок перетворення в енергію маси, приєднаної до оболонки бульбашки і залученої нею в радіальний рух рідини. Ця частина енергії може бути оцінена співвідношенням А. Ейнштейна між масою і енергією:

$$E = mc^2,$$

де $c=3 \times 10^8$ м/с — швидкість світла.

Це є співвідношенням еквівалентності між енергією і масою. Для того, щоб воно діяло як джерело додаткової енергії при кавітації, потрібно введення цілого ряду фізичних факторів і відтворення специфічної ситуації при розвитку кавітаційних процесів. Про специфічну ситуацію при кавітації вже вказувалось вище: в точці схлопування тиск досягає 12000 атм., а температура — 3200 °С.

Звідки береться додаткова енергія при вищезначених факторах? Виникають два види додаткових енергій. Один з них обумовлений впливом цих факторів на енергію схлопування кавітаційних бульбашок, а другий вид енергії пов'язаний із вилученням енергії з внутрішньої енергії робочого тіла.

Додаткова енергія від впливу вказаних фізичних факторів на енергію схлопування кавітаційних бульбашок обчислюється за допомогою гіпотези І.М. Федоткіна за наведеною раніше методикою.

Гідроудари — це короткочасні імпульси значного підвищення тиску, які майже не впливають на витрати енергії насосом, але суттєво впливають на швидкість схлопування і величину енергії, яка при цьому виділяється.

Однак, крім цієї енергії, утворюється ще додаткова енергія за рахунок внутрішньої енергії речовини рідкого робочого тіла, яка вилучається дією сил пружності й обчислюється наступним чином.

Перепади тиску від кінетичної енергії потоку:

$$\Delta p_{\text{кін}} = \rho \frac{w^2}{2},$$

де w — швидкість потоку.

За формулою Н.Е. Жуковського від гідроудару:

$$\Delta p_{\text{уд}} = \rho w c,$$

де c — швидкість розповсюдження пружних хвиль у рідкому робочому тілі, для води $c=1550$ м/с — швидкість поширення звукових хвиль.

Швидкість течії рідини при заданому Δp :

$$w = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p}.$$

Кінетична швидкість потоку:

$$w_1 = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p_{\text{кін}}} = \sqrt{\frac{2}{\rho} \rho \frac{w^2}{2}} \equiv w,$$

тобто дорівнює швидкості потоку.

Для гідроудару швидкість течії після відкриття каналу:

$$w_2 = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p_{\text{уд}}} = \sqrt{\frac{2}{\rho} \rho w c} = \sqrt{2wc},$$

або

$$w_2 = 2c,$$

тобто, швидкість потоку зростає в $2c/w$ раз і для $w=10$ м/с складає:

$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{2c}{w} = \frac{2 \cdot 1500}{10} = 300 \text{ раз},$$

а для $w = 2$ м / с :

$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{2c}{w} = \frac{2 \cdot 1500}{2} = 1500 \text{ раз}.$$

Енергія зростає пропорційно квадрату швидкості та обчислюється за формулою:

$$\Delta E_{\text{num}} = \frac{Q \cdot \tau \cdot \rho}{2T} (w_2^2 - w_1^2),$$

де Q — витратна продуктивність трубопроводу (насоса), τ — проміжок часу перекривання трубопроводу, T — період гідроударів — проміжок часу між двома поточними гідроударами, $w_2=2c$, $w_1=w$.

Така велика енергія вилучається з внутрішньої енергії рідкого робочого тіла гідроударами через посередництво дії сил пружності.

Таке ж положення з гідропульсаціями. При частоті гідропульсацій, близькій або кратній частоті осциляції об'єму кавітаційної бульбашки, виникає резонанс, який збільшує амплітуду коливань оболонки бульбашки і наближає досягнення швидкості світла, збільшуючи величину критичного радіусу:

$$R_{кр} = R_0 \cdot \sqrt[3]{\frac{2p_0 / 3\rho}{(c - v_{пульс})^2 + 2p_0 / 3\rho}},$$

де $v_{пульс} = A \times f$, A — амплітуда, f — частота пульсацій.

З іншого боку, вилучається енергія з внутрішньої енергії рідини дією пульсаційних сил інерції, які стають рушійними силами процесу завдяки введенню нестационарності (коливань).

Пульсації тиску і швидкості згасають уздовж тракту. В кожному попередньому перерізі пульсаційна швидкість більша, ніж у наступному. Виникає інерційний пульсаційний напір, який компенсує втрати тиску на подолання гідравлічного опору і генерує додаткову енергію потоку.

Пульсаційний напір може бути визначений за формулою І.М. Федоткіна [3, 6, 7]:

$$\Delta p_{пульс} = \psi \left(\frac{A}{D} \right) \left(1 + \frac{1}{2} Sh^2 \right) \frac{\rho \cdot w_0^2}{2} (\eta_i^2 - \eta_{i+1}^2),$$

де $\psi = 1, 1 \div 1,3$; A/D — відношення амплітуди A , яка вимірюється довжиною шляху, який проходить рідина за півперіоду пульсацій $T/2$, до діаметра D трубопроводу, w_0 — швидкість течії рідини в трубопроводі, ρ — густина рідини,

$Sh = w_n / w_0 = Re_n / Re_0 = \lambda_{0n} / \lambda_0 = k$ — число Струхалія, w_n — пульсаційна складова швидкості рідини, яка визначається наступним чином.

Миттєве значення дійсної швидкості середовища:

$$w_T = w_{п0} = w_0 + w_* \cdot \sin \omega t,$$

де w_0 — середня швидкість рідини, w_* — амплітудне значення пульсаційної складової.

Середня пульсаційна швидкість визначається за рівнянням:

$$\bar{w}_п = \frac{1}{T} \int_0^T w_T dt.$$

Після інтегрування отримуємо [3, 6, 7]:

$$\frac{\bar{w}_п}{w_0} = \frac{2}{\pi} \left(\arcsin \frac{1}{k} + \sqrt{k^2 - 1} \right),$$

де $k = w_T/w_0 = Sh$ — число Струхалія.

Коефіцієнт згасання пульсацій η визначається величиною [6, 7]:

$$\eta = \frac{w_{пl}}{w_{п0}} = \sqrt{\frac{\Delta p_{пl}}{\Delta p_{п0}}} \exp \left[-\frac{B}{2} \frac{l}{D} \right],$$

де $B = f(A/D, f, w_0, D) = [(a-bw_0) - (c-dw_0)f]$; $\Delta p_{пl}$, $\Delta p_{п0}$ — пульсаційні напори на віддалі l і на вході відповідно.

Гідравлічні пульсації компенсують гідравлічний опір, збільшують силу реактивних струменів, сили Коріоліса, інтенсифікують кавітаційний нагрів рідини, утворюють додаткові нестационарні сили й інерційно-пульсаційні напори. В роботі [8] експериментально підтверджено збільшення пульсаціями сили реактивних струменів у 2,5 рази.

Збільшення сили реактивних струменів можна оцінити, враховуючи додаткову нестационарну гідродинамічну силу, що виникає при пульсаціях [3, 8]:

$$F = \nu \rho S_{ct} C_0 e^{i\omega t} \left[\sum_{j=0}^{\infty} (-1)^j \frac{\left(\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} y \right)^{2j+1}}{(2j+1)!} C_1 + \sum_{j=0}^{\infty} (-1)^j \frac{\left(\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} y \right)^{2j}}{(2j)!} C_2 \right],$$

де ν — кінематична в'язкість, ρ — густина рідини, t — час, ω — частота пульсацій, S_{cm} — поверхня стінки, що контактує з потоком, $i = \sqrt{-1}$.

Гідравлічні пульсації також суттєво збільшують вироблення дисипативної теплової енергії від гідравлічного тертя. В роботах [3 та ін.] отримано наступний теоретичний результат. Маємо, що енергія дисипації в одномірному ламінарному потоці пропорційна:

$$E \sim \left(\frac{\partial w_x}{\partial y} \right)^2 = (\text{grad } w_x)^2,$$

де $\partial w_x / \partial y$ — градієнт поздовжньої швидкості потоку.

В стаціонарному і пульсаційному потоках енергія дисипації відповідно запишеться:

$$E_{cm} \cong \left(\frac{\partial w_{x0}}{\partial y} \right)^2 \text{ і } E_{\text{пульс}} \sim \left(\frac{\partial w_{x0}}{\partial y} + \frac{\partial A}{\partial y} \cos \omega t \right)^2,$$

Середня за чверть періоду пульсацій енергія дисипації пульсаційного потоку буде:

$$\frac{4}{T} \int_0^{T/4} A \cos \omega t dt = \frac{2}{\pi} A(y).$$

Підставивши останнє у вираз для дисипації енергії пульсуючого потоку, отримаємо:

$$E_{\text{пульс}} \sim \left(\frac{\partial w_{x0}}{\partial y} + \frac{2}{\pi} \frac{\partial A}{\partial y} \right)^2.$$

У випадку рівності амплітуди пульсацій швидкості її середній швидкості $A(y)=w_{x0}(y)$, маємо:

$$E_{\text{пульс}} \sim \left(\frac{\partial w_{x0}}{\partial y} \right)^2 \left(1 + \frac{2}{\pi} \right)^2.$$

тобто величина дисипації енергії в порівнянні зі стаціонарним потоком при пульсаціях зростає в:

$$\frac{E_{\text{пульс}}}{E_{\text{ст}}} = \left(1 + \frac{2}{\pi} \right)^2 = 2,68 \text{ разів.}$$

Цей наш теоретичний результат знайшов цілковите експериментальне підтвердження в роботі С.А. Беспалько [9]. Тепло, що виділяється при дисипації енергії пульсуючих течій, отримується за рахунок переходу в тепло внутрішніх рухів рідини, пульсацій потоку, і за умови наявності зворотних течій виникає додаткова енергія без витрат енергії ззовні.

Таким чином, проведеними розрахунками показано, що можна отримувати додаткову дисипативну теплову енергію з різноманітної внутрішньої енергії середовища (рідкого робочого тіла) за рахунок залучення сил пружності за допомогою гідрударів, за рахунок залучення сил інерції за допомогою гідравлічних пульсацій, за рахунок резонансних явищ за допомогою сил інерції при коливаннях та ін. В усіх цих випадках необхідною умовою є введення нестационарності та резонансних режимів.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Федоткин И.М.* Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности / И.М. Федоткин., И.С. Гулый/ — Ч.І, Киев, «Полиграфкнига»ю — 1997 г. — 840 с.; Ч. ІІ, Киев, АО «ОКА» — 2000 г. — 898 с.
2. *Федоткин И.М.* Кавитационные энергетические установки / И.М. Федоткин., И.С. Гулый. — Киев, «Арктур-А», 1998 г. — 134 с.

3. *Ткаченко А.Н.* Производство избыточной энергии / Ткаченко А.Н., Федоткин И. М., Тарасов В.А. — Киев, «Техника», 2001 г. — 332 с.

4. *Федоткин И.М.* Избыточная энергия и физический вакуум / Федоткин И.М., Боровский В.В. — Винница, 2004 г. — 352 с.

5. *Федоткин И.М.* К теории физического вакуума / Федоткин И.М., Шаповалюк Н.И., Боровский В.В. — Винница, 2004 г. — 262 с.

6. *Федоткин И.М.* Интенсификация теплообмена в аппаратах химических производств / Федоткин И.М., Фирисюк В.Р. — Киев, «Техника», 1971 г. — 214 с.

7. *Федоткин И.М.* Интенсификация теплообмена в аппаратах пищевых производств / Федоткин И.М., Липсман В.С. — Москва, «Пищевая промышленность», 1972 г. — 240 с.

8. *Семінська Н. В.* «Удосконалення гідроструминних технологій з врахуванням особливостей формування струменів високого тиску», НТУУ «КПІ», Київ, 2008 р., Автореферат кандидатської дисертації.

9. *Беспалько С.А.* «Дослідження дисипативного нагрівання в замкненому контурі теплогенератора», Автореферат кандидатської дисертації, НТУУ «КПІ», 2009 р.

Одержано редколегією 22.10.2011

И.М. Федоткин, А.Н. Тимонин, А.В. Копыленко

**ПРОИЗВОДСТВО ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В
КАВИТАЦИОННЫХ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРАХ ЗА СЧЕТ
ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ**

Проведенными расчетами показано, что можно получать дополнительную диссипативную тепловую энергию за счет привлечения сил упругости с помощью гидроударов путем использования сил инерции с помощью гидравлических пульсаций и др. Во всех этих случаях необходимым условием есть введение гидравлической нестационарности.

Ключевые слова: кавитация, тепловая энергия, нестационарность, гидроудар, гидравлические пульсации.

I. Fedotkin, A. Timonin, A. Kopylenko

**MAKING OF ADDITIONAL THERMAL ENERGY IN CAVITATION
THERMO-GENERATORS FOR ACCOUNT OF THE HYDRAULIC
UNSTATIONARITY**

It is showed the conducted calculations, that it is possible to get additional dissipative thermal energy due to bringing in of forces of resiliency by hydroblows, due to bringing in of forces of inertia by hydraulic pulsations etc. In all these cases a necessary condition is introduction of hydraulic unstationarity.

Key words: *cavitation, thermal energy, unstationarity, hydroblow, hydraulic pulsations.*