

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 ЗА РАХУНОК ПІДТИСНЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ТРАКТА В КАВІТАЦІЙНИХ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРАХ

В статті наведена методика та приклад розрахунку вироблення додаткової теплової енергії в кавітаційних теплогенераторах за рахунок підтиснення гідравлічного тракту.

Ключові слова: теплогенератор, кавітація, енергія, коефіцієнт перетворення енергії, гідравлічний тракт.

The paper contains the procedure and calculation example of additional heat energy production in cavitation heat-generators due to restrengthening of hydraulic tract.

Key words: heat-generator, cavitation, energy, coefficient of energy transformation, hydraulic tract.

Одним з ефективних методів підвищення кавітаційного нагріву в кавітаційному теплогенераторі (КТГ) є підтиснення його гідравлічного тракту. Підтиснення тракту КТГ конструкції І.М. Федоткіна [1] можна здійснювати в паровому просторі резервуару, в якому обертається ротор з реактивними соплами. Здійснювати підтиснення можна від балону зі стисненим повітрям через роздільний циліндр з вільно встановленим поршнем. При цьому слід мати на увазі, що в граничному випадку можна перейти на режим самопідтиснення, який виникає, якщо не конденсувати пару від скипання легкокиплячого компонента, що використовується в складі робочого тіла теплогенератора, в реактивних соплах ротора. В робочому режимі підтиснення можна досягти без використання балону зі стисненим повітрям за рахунок зменшення конденсації пари та підтримки її тиску на рівні тиску підтиснення, регулюючи подачу охолоджуючої води на змійовики конденсатора пари.

Що дає підтиснення тракту КТГ? Тиск у тракті збільшується, що призводить до збільшення кількості виробленої теплової енергії від схлопування кавітаційних бульбашок при умовах, які визначаються розрахунками і наладкою роботи КТГ. Одночасно збільшується тиск на вході та виході з насоса, а перепад тиску на насосі залишається незмінним і визначається величиною гідравлічного опору контуру КТГ. Перепад тиску на реактивних соплах також не змінюється, оскільки поряд зі збільшенням протитиску перед соплом такою ж мірою зростає тиск на всмоктуванні та нагнітанні насосу.

Як було показано в попередніх статтях, розрахунок кількості енергії від перетворення приєднаної маси рідини, залученої в радіальний рух оболонкою бульбашки при схлопуванні, виконується з використанням формули Релея для швидкості схлопування, рівній швидкості світла $v_{\text{сх}} = c$, звідки визначається радіус бульбашки $R_{\text{сх}}$, на якому оболонка досягає швидкості світла. Після чого для одного бульбашки визначається енергія, що виділяється за рахунок перетворення маси в енергію [2]:

© І.М. Федоткін, О.М. Тимонін, А.В. Копиленко, 2012

$$E_1 = \frac{4}{3} \pi R_{кр}^3 \rho \psi c^2,$$

і вираховується нагрів рідини:

$$\Delta t = \frac{n E_1}{C_p \rho V},$$

де C_p — теплоємність, ρ — густина рідини, $n = \frac{3\phi z V}{4\pi R_0^3}$ — кількість бульбашок у $V=1 \text{ м}^3$ рідини

при дійсному об'ємному паровмісті ϕ і долі бульбашок z , що схлопуються одночасно.

Кількість енергії, що виділяється при схлопуванні бульбашок від радіусу $R_{кр}$ до $R = 0$ в одиницях потужності:

$$N'_{cx} = \frac{C_p \rho V \Delta t}{1000}, \text{ кВт, на } V=1 \text{ м}^3.$$

Для оцінки ефективності енергетичних балансів теплогенераторів в даній роботі використовується поняття коефіцієнта перетворення енергії (КПЕ). Енергія може вироблятися з енергії іншої фізичної природи, тоді діє закон збереження енергії і оцінка дається величиною коефіцієнту корисної дії (ККД), який ніколи не перевищуватиме 1,0 (100 %). Закон збереження енергії діє тільки відносно енергетичних перетворень одного виду в інший і тільки в закритих системах, які ізольовані від навколишнього середовища. Якщо ж енергія залучається з навколишнього середовища (наприклад, в теплових насосах) або виробляється в закритій системі за рахунок перетворення в енергію матерії робочого тіла або інформації (під інформацією розуміють структуру робочого тіла), то в цьому разі оцінку таких перетворень можна оцінити коефіцієнтом перетворення матерії в енергію або інформації в енергію (КПЕ). Тому в [3] І.М. Федоткіним вводиться поняття трьохкомпонентного закону збереження енергії, матерії і інформації. В цьому разі ККД цих сумарних перетворень матерії, інформації і енергії ніколи не буде перевищувати 100 %. Але якщо з цього закону вилучити лише перетворення енергії в енергію, то при наявності притоку енергії від перетворення матерії і інформації коефіцієнт енергетичної складової може бути значно вищим 100 %.

З урахуванням підтиснення тракту ρ_0 , загальний коефіцієнт перетворення енергії (КПЕ₀) теплогенератора буде виражатися величиною:

$$\text{КПЕ}_0 = \text{КПЕ} + \text{КПЕ}' = \frac{N_{cx} + N'_{cx}}{N_H} = \frac{knp + \frac{C_p \rho V \Delta t}{1000}}{k_3 \Delta p},$$

$$\text{де } R_{кр} = R_0 \sqrt{\frac{3\rho_0 / 2\rho}{c^2 + 3\rho_0 / 2\rho}}, \quad k = 0,25 \cdot 10^3 (0,915)^{0,6} \left(\frac{R_0 \rho g}{\rho_s} \right)^{0,3} \frac{V_0}{\rho_s},$$

$$k = \frac{1}{3600 \cdot \eta_n \eta_e}, \quad k_3 = k_1 V, \quad k_2 = \left(\Sigma \xi + \lambda \frac{L}{d} \right) \frac{\rho}{2} \left(\frac{4V}{3600 \pi d^2} \right)^2.$$

В цій залежності: $\text{КПЕ} = N_{cx} / N_H$ — частка коефіцієнта перетворення енергії за рахунок вироблення додаткової енергії від підтиснення тракту ρ_0 ; $\text{КПЕ}' = N'_{cx} / N_H$ — частка за рахунок вироблення енергії від перетворення приєднаної маси рідини після досягнення радіальною швидкістю змикання оболонки швидкості світла.

Поряд з відміченими позитивними процесами при підтисненні тракту проявляється і процес, який може за певних умов негативно впливати на вироблення енергії, — це процес стиснення кавітаційних бульбашок, що призводить до зменшення їх розмірів R_{cr} і R_0 . Як було показано в попередніх статтях, кількість енергії, що виробляється, не залежить від розмірів кавітаційних бульбашок у межах до величини радіусів, при яких бульбашка втрачає стійкість. Цей висновок справедливий тільки при незмінному дійсному паровмісті. Якщо ж при підтисненні паровміст зменшується, то цей висновок не діє. Тому розглянемо, які можуть бути втрати енергії від стискання об'єму бульбашок при підтисненні.

Розрахунки підтиснення

Витрати енергії на насосі N_H визначаються гідравлічними опорами тракту КТГ, цьому відповідає перепад тиску Δp при витратній продуктивності насоса V , м³/год:

$$N_H = \frac{V}{3600 \cdot \eta_n \eta_e} \cdot \Delta p = k_1 V \Delta p,$$

де η_n , η_e — ККД насоса й електродвигуна.

$$\Delta p = \left(\Sigma \xi + \lambda \frac{L}{d_{mp}} \right) \frac{\rho w^2}{2}, w = \frac{4V}{3600 \pi d_{mp}^2}.$$

В свою чергу, згідно з законом Дарсі: Об'єднуючи ці формули, отримуємо:

$$N_H = \frac{1}{3600 \cdot \eta_n \eta_e} \cdot k_1 \left(\Sigma \xi + \lambda \frac{L}{d_{mp}} \right) \frac{\rho}{2} \left(\frac{4V}{3600 \pi d_{mp}^2} \right)^2.$$

Енергія, яка виділяється при схлопуванні, має дві складові. Перша — це енергія, яка виділяється при змиканні оболонки бульбашки від початкового радіусу R_0 до критичного R_{cr} , при якому швидкість радіального руху бульбашки досягає швидкості світла.

Ця перша складова енергії однозначно залежить від тиску оточуючої бульбашку рідини в першій степені [2,3]:

$$N_{ex} = n E_1 = k n p_0,$$

$$\text{де } k = 0,25 \cdot 10^3 \frac{4\pi R_0^3}{3} \left(\frac{R_0 \rho g}{p_s} \right)^{0,3}, n = \frac{3z\varphi V}{4\pi R_0^3} — \text{кількість бульбашок у } 1 \text{ м}^3 \text{ рідини, } \varphi — \text{дійсний}$$

паровміст (від 0,1 до 0,5), R_0 — початковий радіус бульбашки, м; z — доля кавітаційних бульбашок, які схлопуються одночасно, $z > 0,3 \div 0,5$. Коефіцієнт k отримано з формули для схлопування одиничної бульбашки до досягнення її оболонкою швидкості світла [2]:

$$\frac{E_0}{p_s V_0} = 0,25 \cdot 10^3 (0,915)^{0,6} \left(\frac{R_0 \rho g}{p_s} \right)^{-0,3} \frac{1}{p_s} p_0,$$

де p_s — тиск насиченої пари при $t = t_0$.

Ця складова енергії зі зростанням тиску оточуючої рідини збільшується в стільки разів, у скільки збільшився тиск. КПЕ від першої складової становитиме:

$$\text{КПЕ} = \frac{N_{ex}(p_0)}{N_H(\Delta p)} = \frac{k n p_0}{k_1 k_2 V^3} = \frac{k n p_0}{k_3 \Delta p}.$$

Цю частину КПЕ можна збільшувати при підтисненні в стільки разів, у скільки збільшується тиск у тркті, за вирахуванням зменшення енергії від зменшення V_0 — початкового об'єму бульбашки. Це зменшення враховується наступним чином.

Врахування стиснення об'єму кавітаційних бульбашок при підвищенні тиску в тркті. Стиснення кавітаційної бульбашки під дією підвищеного тиску приймемо політропічним. При початковому тиску в потоці $p_1 = 1$ атм, після підвищення його до величини $p_2 = 10$ атм отримаємо зменшення об'єму бульбашки від V_1 до V_2 згідно:

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma,$$

$$\text{де } \gamma = C_p / C_v = 1,4.$$

Зменшення об'єму бульбашки буде складати:

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/\gamma} = 10^{1/1,4} = 10^{0,714} = 5,18 \text{ разів.}$$

Таким чином, перша складова енергії схлопування при підвищенні тиску від 1 до 10 атм збільшилась у 10 разів, а від зменшення об'єму бульбашок унаслідок їх стиснення — зменшилась у 5,18 разів. Загалом перша складова зросла у $10/5,18 = 1,93 \approx 2$ рази.

Складніше з другою складовою енергії схлопування. Вона залежить від величини критичного радіусу $R_{кр}$, часу схлопування τ , швидкості схлопування $v_{сх}$. Від підвищення тиску $R_{кр}$ зростає незначним чином, час τ суттєво зменшується, і швидкість значно зростає. Тому цю другу складову енергії схлопування слід розрізняти і як потенціальну (за формулою А. Ейнштейна), і як кінетичну (за формулою кінетичної енергії схлопування).

Потенціальна частка другої складової зростає незначним чином, проте кінетична — суттєво збільшується. В нашому прикладі оцінка енергетичних змін другої складової енергії схлопування при підтисненні тракту від 1 до 10 атм виглядає наступним чином.

Зміна початкового R_0 і критичного $R_{кр}$ радіусів бульбашки складає:
 $R_0 = V^{1/3} = 5,18^{1/3} = 1,73$ рази (зменшується);

$$R_{кр} = R_0 \sqrt[3]{\frac{3p/2\rho}{c^2 + 3p_0/2\rho}} = \frac{\sqrt[3]{10}}{1,73} = \frac{2,15}{1,73} = 1,24 \text{ рази (збільшується).}$$

Фізично це пояснюється тим, що при підвищенні тиску навколишньої рідини значно зростає швидкість схлопування, і, не дивлячись на зменшення R_0 , критичний радіус досягається скоріше, на більшому розмірі $R_{кр}$.

Збільшення потенціальної енергії схлопування в другій складовій буде складати:

$$E = \frac{4}{3} \pi R_{кр}^3 \rho v_{сх}^2 = 1,24^3 = 1,91 \text{ разів.}$$

Час схлопування зменшується в:

$$\tau = 0,915 R_{кр} \sqrt{\frac{\rho}{p}} = \frac{\sqrt{10}}{1,24} = \frac{3,16}{1,24} = 2,55 \text{ разів.}$$

Середня швидкість схлопування в інтервалі $R_{кр} - 0$ зростає в:

$$\bar{v} = \frac{R_{кр}}{\tau} = 1,24 / 2,55 = 3,16 \text{ разів.}$$

Більш точно середню швидкість схлопування можна вирахувати через поточну [2,4]:

$$\dot{R}^2 = \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 = \frac{2}{3} \frac{p_0}{\rho} \left(1 - \frac{R_{кр}^3}{R^3}\right),$$

$$\bar{R}^2 = \frac{1}{R_{кр}} \frac{2}{3} \frac{p_0}{\rho} \int_0^{R_{кр}} \left(1 - \frac{R_{кр}^3}{R^3}\right) dR = \frac{4p_0}{3\rho}, \text{ разів}$$

$$\bar{R} = \sqrt{\frac{4p_0}{3\rho}} = \sqrt{10} = 3,16,$$

тобто середня швидкість збільшується у 3,16 разів, маємо таку ж чисельну оцінку.

Кінетична енергія схлопування в другій складовій зростає в:

$$E_{кин} = \frac{\rho \bar{v}^2}{2} = 3,16^2 \approx 10 \text{ разів.}$$

Таким чином, при збільшенні тиску в тратті в 10 разів кінетична енергія другої складової енергії схлопування збільшується також у 10 разів, а потенціальна енергія схлопування другої складової збільшується в 1,91 разів. Ці оцінки якісно показують хід процесу.

КПЕ' від зростання другої складової енергії схлопування буде дорівнювати

$$КПЕ' = \frac{N_{пот} + N_{кин}}{N_{нас}} = \frac{nE_1 + \frac{\rho \bar{v}_{сх}^2}{2}}{k_3 \Delta p}$$

і зростає в $(1,91 + 10) = 11,9$ разів у порівнянні з КПЕ' при тиску 1 атм. Загальне зростання КПЕ₀ буде дорівнювати:

$$КПЕ_0 = КПЕ + КПЕ' \cdot 10 + 11,9 = 21,9 \text{ разів.}$$

Зростання тиску в 10 разів практично досягти важко. Якщо прийняти зростання тиску в 2 рази, то слід очікувати збільшення КПЕ в:

$$КПЕ \sim \sqrt{10} + \sqrt[3]{10} = 3,16 + 2,15 \text{ разів,}$$

а КПЕ₀ — максимум у $21,9/5 = 4,2$ рази.

Таким чином, теоретично доведено, що при кавітації утворюються дві складові енергії. Перша — внаслідок схлопування від початкового радіуса R_0 до критичного $R_{кр}$, при якому $v_{сх} = c$ — оболонка досягає швидкості світла. Друга складова виникає при схлопуванні в інтервалі $R - R_{кр}$ і $R = 0$. Ця складова має потенціальну та кінетичну частини, які від підтиснення гідравлічного тракту теплогенератора значно збільшуються, чим обумовлюється зростання коефіцієнта перетворення енергії. Практично цим відкривається можливість до значного зростання коефіцієнта перетворення енергії в кавітаційних теплогенераторах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Патент України на корисну модель № U 31861 від 25.04.2008, «Кавітаційний теплогенератор» // І.М. Федоткін, Н.Г. Федоткіна-Гінсгеймер.
2. Федоткин И. М. Кавитационные энергетические установки / И.М. Федоткин, И.С. Гулый. — К.: «Арктур-А», 1998 г. — 134 с.
3. Ткаченко А.Н. Производство избыточной энергии / Ткаченко А.Н., Федоткин И.М., Тарасов В.А. — К.: «Техника», 2001 г. — 332 с.

Одержана редколлегією 17.10.2011 р.