

## THE RESEARCH OF WORKING PROCESSES IN SUPERSONIC NOZZLE

I.M. Fedotkin, A.N. Timonin, A.F. Fesenko

*National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»*

A.V. Kopylenko

*National University of Food Technologies*

<b>Key words:</b> low potential energy Supersonic nozzles Research, air movement Ejection Nozzle Air engine	<b>ABSTRACT</b> The article outlines the technical possibilities of low potential environmental energy appliance with the using of heat transformer. A model of a supersonic nozzle cap is proposed for solving this problem. A mathematical basis of the idea and the analysis of the survey results of supersonic nozzle are presented and checked by the programs Solid Works and ANSYS, and the efficiency of the proposed design is confirmed. A principal functional scheme of engine that works with the help of the air is given. The air current is created by the fan blower of low power or by mini compressor. The current increases its kinetic energy in a battery of supersonic nozzle cap of I.M. Fedotkin construction.
<b>Article history:</b> Received 20.05.2013 Received in revised form 17.06.2013 Accepted 25.07.2013	The cooling of the current is due to the reduction of enthalpy. The low potential heat is transformed into kinetic energy. The examples of the industrial applications of the model are presented.
<b>Corresponding author:</b>  E-mail: npnuht@ukr.net	

## ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ В НАДЗВУКОВІЙ СОПЛОВІЙ НАСАДЦІ

I.M. Федоткін, О.М. Тимонін, А.Ф. Фесенко

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»*

A.V. Копиленко

*Національний університет харчових технологій*

*В статті розглядається технічна можливість використання низько потенційної енергії навколишнього середовища з застосуванням теплового трансформатора. Запропонована конструкція надзвукової соплової насадки для вирішення цієї проблеми. Представлене математичне обґрунтування ідеї, а також приведений аналіз результатів дослідження надзвукової насадки, проведеного за допомогою програм Solid Works та ANSYS, підтверджена працездатність запропонованої конструкції. Наведені приклади промислового використання розглянутої ідеї.*

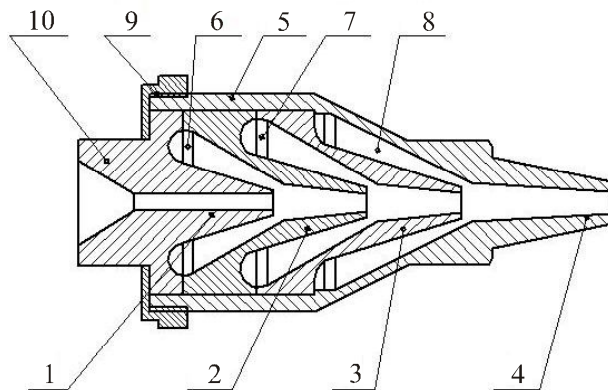
**Ключові слова:** *низько потенційна енергія, надзвукова насадка, дослідження, рух повітря, ежекція, сопло, повітряний двигун.*

Проф. І.М. Федоткіним запропонована ідея використання низько потенційної енергії навколишнього середовища (повітря) і за допомогою теплового трансформатора перетворення її в кінетичну енергію потоку повітря, з якої в подальшому можна виробляти обертальну механічну або інші види енергії. З метою реалізації цієї ідеї була розроблена конструкція надзвукової соплової насадки.

Надзвукова насадка складається з набору сопел 1, 2, 3, 4 (рис. 1), розмічених в корпусі 5. Сопла з корпусом утворюють глухі камери 6, 7, 8 (пазухи). Корпус 5 з'єднується різьбою 9 із вхідним патрубком 10.

Твірні зовнішніх поверхонь попередніх сопел і внутрішніх поверхонь наступних утворюються за формулою  $y = ax^2$ , при цьому параметр  $\alpha$  визначається, як відношення

$a = \frac{l_y}{l_x^2}$ , де  $l_y = \frac{D}{2} - \frac{d}{2} = R - r$  — різниці радіусів периферійного перерізу міжсоплової камери і вихідного отвору сопла, а  $l_x$  — віддаль по осі сопла, яка визначає його довжину по осьовій лінії, параметр  $\alpha$  у зовнішній поверхні попереднього сопла буде завжди більший за параметр  $\alpha$  внутрішньої поверхні наступного сопла.



**Рис. 1. Схема надзвукової соплової насадки**  
1, 2, 3, 4 — сопла; 5 — корпус;  
6, 7, 8 — пазухи; 9 — різьбове з'єднання; 10 — вхідний патрубок

Кут звуження насадки при вершині конуса становить від  $1,5^\circ$  до  $6 - 8^\circ$ . При цьому в кожному соплу між діаметром виходу з сопла  $d_{вих}$  і діаметром входу  $d_{вх}$  утримується співвідношення

$$d_{вих} = d_{вх} - 2 \cdot L \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}, \quad \alpha = 1,5 \dots 8^\circ \quad (1)$$

де  $L$  — довжина каналу сопла.

Внутрішній об'єм каналу сопла розраховується як об'єм зрізаного конуса:

$$V_c = \frac{1}{3} \pi \cdot L \cdot (R^2 + r \cdot R + r^2), \quad (2)$$

де  $L$  — довжина каналу;  $R$  і  $r$  — радіуси каналу відповідно на вході і виході.

Об'єм пазух розраховується, як різниця об'ємів зовнішньої і внутрішньої поверхні зрізаного конуса.

Між об'ємом пазух  $V_{п}$  і об'ємом сопел  $V_c$  витримується співвідношення:

$$V_{п} = m \cdot V_c, \quad (3)$$

де  $m = 1,2 - 1,5$  до  $2,0$  і наростає по ходу потоку.

Принцип роботи соплової насадки полягає в наступному. Конус зовнішньої поверхні насадка 1 утворює з конусом внутрішньої поверхні насадки 2 порожнину 6. Потік рідини втікає в патрубок 10 і утворює струмінь, який виходить із сопла 1. Під дією струменя в порожнині 6 утворюється вакуум. Тиск перед соплом 1 падає, збільшується перепад тиску між входом в патрубок 10 і виходом з сопла 1. Збільшення цього перепаду тиску призводить до прискорення руху струменя.

Прискорення руху струменя зумовлює зростання вакууму в порожнині 6, що збільшує перепад тиску між входом 10 і виходом з сопла 1. Це викликає подальше прискорення струменя, що виходить із сопла 1. Внаслідок цього утворюється процес з позитивним прогресуючим зворотнім зв'язком.

Аналогічні процеси протікають в конусах сопел 2, 3 і пазухах 7, 8.

Перепади тиску, які при цьому виникають, при використанні крапельної рідини в якості робочого тіла, спричиняють крім того скипання перегрітої рідини. Пара, яка при цьому утворюється, надзвичайно прискорює рух струменів, оскільки об'єм пари від 15 до 150 разів більший за об'єм рідини.

Процес прискорення руху струменів закінчується після досягнення ними надзвукової швидкості, яка для паро — рідинної суміші наближається до 1500 м/с.

Газодинамічне і термодинамічне обґрунтування

Повна кількість тепла, підведеного до газу в процесі зміни його стану від початкового 1 до кінцевого 2, можна визначити з рівняння

$$Q_{12} = u(p_2 T_2) - u(p_1 T_1) + \int_{v_1}^{v_2} p(vT) dv \quad (4)$$

де  $u = c_v T$  — внутрішня енергія газу;  $p$  — тиск;  $T$  — абсолютна температура;  $V$  — питомий об'єм.

Якщо тепло не підводиться ( $Q_{12} = 0$ ), з рівняння (4) випливає, що газ здійснює роботу при розширенні за рахунок зменшення внутрішньої енергії, тобто за рахунок зниження температури. У рівнянні (4) інтеграл істотно залежить від вигляду і форми кривої, що визначає хід процесу розширення.

Між тим, згідно з теорією термодинаміки, рівняння

$$dQ = du + p dv \quad (5)$$

можна звести до повного диференціала множенням кожного члена на  $\frac{1}{T}$ , що є інтегруючим множником. Після цього вираз (5) стає повним диференціалом деякої функції, яка називається ентропією  $S$ :

$$dS = \frac{dQ}{T} = \frac{du}{T} + \frac{p}{T} dv \quad (6)$$

За допомогою рівняння Клапейрона і рівняння Майера  $C_p = C_v + RT$ , отриманого з рівності  $C_p(T - T_0) = C_v(T - T_0) + p(v + v_0)$ , з використанням того ж рівняння Клапейрона  $pv = RT$  і  $pv_0 = RT_0$ , після скорочення на  $(T - T_0)$  отримаємо з (6)

$$dS = C_p \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v} = C_p \frac{dT}{T} + (C_p - C_v) \frac{dv}{v}, \quad (7)$$

де  $C_p$  — теплоємність при постійному тиску;  $C_v$  — теплоємність при постійному об'ємі;  $R$  — газова стала.

Тепер рівняння (7), яке є повним диференціалом, можна проінтегрувати, оскільки процес уже не залежатиме від шляху і переходу процесу з одного стану в інший

$$S - S_0 = C_p \ln \frac{T}{T_0} + (C_p - C_v) \ln \frac{v}{v_0} = C_v \left[ \frac{T}{T_0} \left( \frac{p}{p_0} \right)^{(k-1)} \right] \quad (8)$$

де  $k = \frac{C_p}{C_v}$  — показник політропи; Пуассони  $\frac{p}{\gamma^k} = \frac{p_0}{\gamma_0^k} = const$ ,  $pv^k = pv_0^k = const$ .

Рівняння (8) також можна представити у вигляді

$$S - S_0 = C_v \ln \left[ \frac{pv}{pv_0} \left( \frac{v}{v_0} \right)^{(k-1)} \right] = C_v \ln \left[ \frac{p}{p_0} \left( \frac{v}{v_0} \right)^k \right] = C_v \ln \frac{p\gamma_0^k}{p_0\gamma^k} \quad (9)$$

В ізоентропічному процесі ентропія постійна  $S = const$ , тоді рівняння набирає вигляду

$$di = du + d(pv) = du + (pdv + vdp) \quad (10)$$

з якого легко помітити зв'язок між ентальпією газу  $i$ , внутрішньою енергією і роботою, здійснюваною газом у процесі розширення. При постійній ентальпії в адиабатичному процесі ( $i = const$ ) газ здійснює роботу розширення за рахунок зниження температури.

Енергобаланс надзвукового сопла можна представити в такому вигляді

$$C_v T_1 + \frac{p_1}{\rho_1 g} + \frac{w_1^2}{2g} = C_v T_2 + \frac{p_2}{\rho_2 g} + \frac{w_2^2}{2g} \quad (11)$$

де індекс 1 належить до параметрів на вході в сопло, а індекс 2 — на виході з сопла;  $p$ ,  $w$ ,  $C_v$ ,  $\rho$ ,  $T$  — відповідно: тиск, швидкість, теплоємність, густина повітря і його абсолютна температура.

Рівняння нерозривності потоку відобразить постійність масової витрати повітря в соплі за відсутності його підсосу

$$G = \rho_1 w_1 = \rho_2 w_2 = const \quad (12)$$

З рівняння (11) швидкість повітря на виході з сопла дорівнює

$$w_2 = \sqrt{2g \left[ \frac{p_1}{\rho_1 g} - \frac{p_2}{\rho_2 g} + (C_v T_1 - C_v T_2) \right]} + w_1^2 \quad (13)$$

З цього випливає, що зростання швидкості в надзвуковому соплі, яке спричиняє зростання кінетичної енергії потоку, відбувається за рахунок зниження ентальпії, внутрішньої енергії газу, унаслідок чого відбувається його охолодження.

Враховуючи рівняння постійної масової витрати газу за відсутності підсосу (12), збільшення кінетичної енергії потоку повітря відбуватиметься не пропорційно. За умови

$$\rho_1 w_1 = \rho_2 w_2 = const, \quad \frac{\rho_2 w_2^2}{2} = \frac{\rho_1 w_1}{2} w_2, \quad \text{збільшення кінетичної енергії буде дорівнювати}$$

$$\frac{\rho_2 w_2^2}{2} \cdot \frac{2}{\rho_1 w_1^2} = \frac{\rho_1 w_1 w_2}{\rho_1 w_1^2} = \frac{w_2}{w_1} \text{ раз,} \quad (14)$$

тобто пропорційне збільшенню швидкості, а не її квадрату.

Для суттєвого збільшення кінетичної енергії потоку необхідно по ходу потоку додавати повітря, збільшуючи його масову витрату. Виникає задача створення такого сопла, вірніше батареї сопел, які могли б безперервно і наскільки потрібно нарощувати кінетичну енергію потоку.

Обмеження при цьому все ж буде. Воно накладатиметься межею охолодження потоку — абсолютним нулем  $-273^\circ\text{C} = 0\text{ K}$ , вірніше близьким наближенням до цієї межі.

Масовий потік повітря може бути збільшений за рахунок створення паралельних потоків. Кількість послідовно включених сопел обмежена ступенем охолодження повітря, а кількість паралельних потоків не обмежена.

При послідовному з'єднанні сопел між їхніми секціями, окрім перших, де діє розрідження, розміщуються повітряні ежектори. Повітря, що ежекується з навколишнього середовища, за правилом змішування Ріхмана піднімає температуру потоку

$$\begin{aligned} (\rho_k w_k + \rho_0 w_0) T_{зм} &= \rho_k w_k T_k + \rho_0 w_0 T_0, \\ T_{зм} &= \frac{\rho_k w_k T_k + \rho_0 w_0 T_0}{\rho_k w_k + \rho_0 w_0} \end{aligned} \quad (15)$$

де  $T_{зм}$  — температура потоку  $\rho_k w_k$  після змішування його з підсмоктуваним повітрям  $\rho_0 w_0$ .

Отже, завдання щодо використання повітряного потоку, який створюється міні-компресором невеликої потужності для отримання значної кількості кінетичної енергії, яка здатна обертати повітряну турбіну значно більшої потужності, вирішити принципово можливо. При цьому буде скидатися чисте повітря, тільки значно охолоджене (до  $-150 \dots -180$  °C). Надлишкова кінетична енергія вилучатиметься з повітря за рахунок його охолодження. При цьому може бути вирішена також проблема забруднення навколишнього середовища.

На цьому принципі побудована принципова функціональна схема двигуна, що працює на повітрі (рис. 2). Потік повітря створюється вентилятором малої потужності або міні-компресором. Потік нарощує свою кінетичну енергію в батареї надзвукових сопел конструкції І.М. Федоткіна. При цьому відбувається охолодження потоку за рахунок зниження ентальпії. Низькопотенційне тепло перетворюється в кінетичну енергію. На виході із першої частини батареї створюється розрідження, за рахунок чого підсмоктується повітря з навколишнього простору, збільшуючи потужність потоку. На подальших ступенях для цього використовуються ежектори. Досягнувши великої потужності, енергія потоку повітря за допомогою повітряної турбіни перетворюється на обертальну. На турбіну може спрямовуватися достатня кількість паралельних потоків, наприклад, шляхом використання сопла Лавалю і турбіни такого ж типу. Такий пристрій може одночасно виробляти тепло і холод, які можна розділити і використовувати в холодильниках, для обігрівання приміщень, нагрівання води тощо, а змішані холодне і тепле повітря — повітряний потік надзвукової швидкості направити в повітряну турбіну агрегатів і пристроїв різного призначення.

Випробування надзвукового сопла

Дослідження надзвукової соплової насадки були здійснені за допомогою програм SolidWorks та ANSYS тільки для однієї серії дослідів з вибраними параметрами зростання швидкості руху повітря від входу в сопло до виходу з нього, розраховане за програмою SolidWorks. Швидкість зростала від 350 м/с до 730 м/с, тобто в 2,08 рази. При цьому температура повітря знижувалась від  $+75$  °C до  $-125$  °C. На цьому ж графіку верхня лінія показує температуру пограничного шару газу біля стінки. За форматом вибраної координатної системи ця лінія є горизонтальною і відповідає максимальній температурі газового потоку. Сплески на ній характеризують пульсації температури, локально відповідні конструктивним особливостям сопла.

Температура надзвукового газового потоку біля стінки може бути вельми значною. Це витікає з наступних міркувань. Дисипативна функція, що визначає кількість тепла, яке виділяється внаслідок тертя потоку газу об стінку, виражається квадратом градієнта подовжньої швидкості газу.

$$Q \approx \left( \frac{dw_x}{dy} \right)^2 = \left| \frac{w_x}{\delta} \right|^2$$

Модуль цієї функції оцінюється правою часткою рівності, де  $\delta$  — товщина прикордонного шару — дуже мала величина, а  $w_x$  — величина значна, оскільки число

$$\text{Маха } M = \frac{w_x}{a_{зв}} > 2,0.$$

Пульсації потоку збільшують величину  $Q$  ще більше. Так, при пульсаціях  $w_{xn} = w_x + A \cos \omega t$ , сила тертя

$$F' = \mu \left( \frac{\partial w_{xn}}{\partial y} \right) = \mu \left( \frac{\partial w_x}{\partial y} + \frac{\partial A}{\partial y} \cos \omega t \right).$$

При  $A = w_x$

$$Q = \mu \left( \frac{\partial w_x}{\partial y} \right)^2 \cdot (1 + \cos wt)^2$$

При осередненні виразу  $\cos wt$

$$\frac{4}{T} \int_0^{T/4} \cos wt dt = \frac{2}{\pi} \left( \sin \frac{\pi}{2} - \sin 0 \right) = \frac{2}{\pi}$$

збільшення дисипативної функції визначиться як

$$\frac{Q_n}{Q} = \frac{\mu \left( \frac{\partial w_x}{\partial y} \right) \left( 1 + \frac{2}{\pi} \right)^2}{\mu \left( \frac{\partial w_x}{\partial y} \right)} = \left( 1 + \frac{2}{\pi} \right)^2 = 2,68 \text{ раза.}$$

Розігрів шару газу біля стінок може бути ефективно використаний для продовження циклів охолодження при послідовному з'єднанні сопел.

Наростання швидкості руху повітря від входу в сопло до виходу з нього, розраховані за програмою ANSYS. Швидкість зросла від 49,3 м/с до 542 м/с. Температура при цьому знижується від 344 К до 300 К.

Отримані дані випробувань з деяким наближенням відображають описаний вище хід процесів в соплі.

### **Висновки**

Картина випробувань, отриманих за допомогою програм SolidWorks та ANSYS, недосяжна у фізичному експерименті через відсутність засобів точкових вимірювань, але це не виключає і не зменшує роль фізичного експерименту для підтвердження запропонованої ідеї.

Розроблене надзвукове сопло може бути застосоване для виготовлення і випуску екологічно чистих повітряних холодильників, економічних теплогенераторів. Використовуючи вихлопні гази літаків, що мають температуру 850 °С, і охолоджуючи їх до забортної температури — 50 °С... — 150 °С, можна значно збільшити реактивну тягу літаків, а отже істотно знизити витрати палива. І нарешті, можливе створення повітряних двигунів для вітряних установок з ежекційним підсиленням, а також для використання в інших агрегатах і системах.

### **Література**

1. Патент України №68210, МПК F 02 K7/00. Зверхзвуковий насадок І. М. Федоткіна для рідин або газів / І. М. Федоткін, А. Ф.Фесенко — заявка №201105945 від 12.05.2011. — опуб. 26.03.2012, Бюл. № 6.
2. Дейч М.Е. Зарянкин А.Е. Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин. М.: Энергия, 1970. — 384 с.
3. Черный И.А. Основы газовой динамики. М.: Новости нефтяной и горно-топливной литературы, 1061.-196 стр.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В СВЕРХЗВУКОВОЙ СОПЛОВОЙ НАСАДКЕ**

**И.М. Федоткин, А.Н. Тимонин, А.Ф. Фесенко**

*Национальный Технический Университет Украины «Киевский политехнический институт»*

**А.В. Копыленко**

*Национальный Университет Пищевых Технологий*

*В статье рассматривается техническая возможность использования низко потенциальной энергии окружающей среды с применением теплового трансформатора. Предложена конструкция сверхзвуковой сопловой насадки для решения этой проблемы. Представлено математическое обоснование идеи, а также приведен анализ результатов исследования сверхзвуковой насадки, проведенного с помощью программ Solid Works и ANSYS, подтверждена работоспособность предложенной конструкции. Приведены примеры промышленного использования рассматриваемой идеи.*

**Ключевые слова:** *низко потенциальная энергия, сверхзвуковая насадка, исследования, движение воздуха, эжекция, сопло, воздушный двигатель.*