

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
МІНІСТЕРСТВО ПРОМИСЛОВОЇ ПОЛІТИКИ УКРАЇНИ
МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО
НАЦІОНАЛЬНИЙ АЕРОКОСМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ім. М.Є.ЖУКОВСЬКОГО "ХАР"
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ВИРОБНИЦТВО ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

МАТЕРІАЛИ VI МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ
КОНФЕРЕНЦІЇ „АВІА-2004”
26-28 квітня 2004 року

Том 3

Київ 2004

ОПТИМАЛЬНИЙ НАДЗВУКОВИЙ ЕЖЕКТОР В ЯКОСТІ ДОТИСКУЮЧОГО КОМПРЕСОРА

Аерокосмічний інститут, e-mail: sad @ nau.edu.ua

Наведено розрахункові дослідження надзвукового ежектора з метою використання в якості дотискуючого компресора на вході в блок компресорних станцій в умовах зниження тиску в мережах природного газу

Один із шляхів вирішення національної проблеми газифікації автомобілів в Україні

Газифікація автомобільного транспорту в Україні має великі перспективи. В світовому балансі моторних палив зростає доля альтернативних. Україна є лідером серед країн СНД в використанні стиснутого газу в якості транспортного палива, продаж якого втричі більший, ніж в Росії. Міністерство транспорту України в 2004 році запланувало розпочати масоване переведення державних автомобілів на газодизельний цикл, який зменшує долю паливних втрат до 31%, а природного газу – до 25%.

Автомобільний парк с кількістю автобусів в 200 одиниць при переході на газодизельний цикл може в рік зекономити до 5 млн. грн. З метою екологічної безпеки планується організація транскордонних "блакитних коридорів" на автошляхах України з використанням тільки природного газу. [1].

Потенціал мережі 87 автомобільних газонаповнювальних компресорних станцій (АГНКС), які розташовані в 65 містах України, складає 685 млн. м³ за рік. Споживачам продається тільки 300 млн. м³. Заплановані в 2003 році збитки НАК "Нафта газ України" від недовикористання можливостей АГНКС склали біля 70 млн. грн. [2].

Однією з основних причин такого становища справ є зниження тиску в газових мережах за межу мінімального, інколи до 0,3 МПа, тоді як переважна більшість АГНКС розраховані на тиск в мережі від 0,8 до 1,2 МПа. Цю проблему заплановано вирішити шляхом розробки дотискуючого електропневматичного типу, що значно погіршить економічні показники АГНКС.

Авторами статті проведені розрахунки можливого використання надзвукового ежектора в якості дотискуючого – струминного апарату, в якому для підвищення енергії одного потоку газу використовується енергія іншого потоку газу.

Перевагами використання такого методу є:

- відсутність споживання електроенергії;
- відсутність необхідності в технічному обслуговуванні;

- мала вартість виготовлення та монтажу;
- простота конструкції, малі габаритні розміри та ін.

Аналіз роботи АГНКС з дотискуючим компресором ежекторного типу

Енергетичну та технічну можливість включення надзвукового ежектора в принципову схему АГНКС показано на рис. 1.

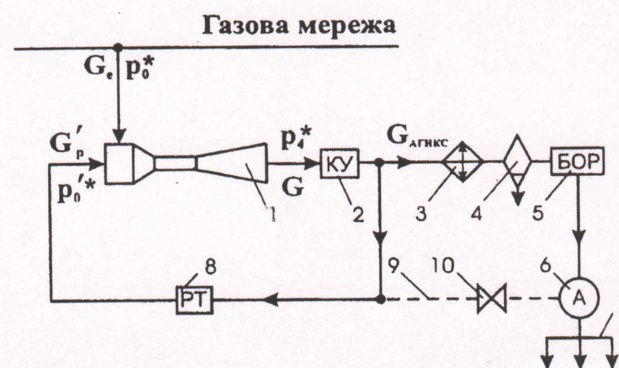


Рис.1. Спрощена схема АГНКС-500 з використанням ежектора для підвищення тиску на вході в компресорну установку

1-ежектор; 2-компресорна установка; 3-апарат повітряного охолодження; 4-вологомасловідділювач; 5-блок осушення газу і регенерації; 6-акумулятор; 7-заправна галерея; 8-регулятор тиску газу; 9-газопровід для пуску АГНКС; 10-кран пуску

Схемою передбачено надходження газу з газової мережі через надзвуковий ежектор-1 до компресорної установки-2, яка здійснює його стиснення в багатоступеневих компресорах з проміжним охолодженням в холодильниках-3 до 25 МПа. Після відділення вологи та масляних домішок в агрегаті -4, осушення до вмісту вологи 9 мг/м³ в блоці-5 газ надходить до акумулятора-6, де зберігається до моменту відпускання споживачам на заправній галереї -7.

В акумуляторі підтримується тиск на рівні 20,5...24,5 МПа. У разі падіння тиску газу в акумуляторі нижче ніж 20 МПа при недостатній продуктивності компресорів перекидається підведення газу на заправну галерею до поповнення акумулятора.

Пропонується підтримувати тиск на вході в компресорну установку p_4^* за рахунок ежекування газу G_e з тиском p_0^* з газової мережі, використовуючи енергію стисненого газу G_p з тиском p_0^* через регулятор тиску-8. Для пуску АГНКС в умовах падіння тиску в газовій мережі до мінімально припустимих величин потрібно змонтувати газопровід-9 з краном-10.

Штрихами (/) позначено параметри газу, що тече крізь надзвукове сопло, а зірочкою (*) - параметри гальмування.

Витрата газу через компресорну установку складатиме величину $G = G_p + G_e$, при цьому до акумулятора надходитиме газ з витратою $G_{\text{АГНКС}} = G - G_p$. Відношення масових витрат газу, що ежекується, і робочого газу в ежекторі називають коефіцієнтом ежекції струменевого $K = G_e / G_p$ дотискувача.

Мета дослідження

Метою дослідження є пошук оптимального ежектора для роботи АГНКС-500 з п'ятьма компресорами типу 2ГМ-4-1,3/12-250 в умовах тиску в газовій мережі 0,3 МПа.

Аналіз рівнянь ежекції надзвукового ежектора та можливих режимів його роботи в умовах АГНКС

Принципова схема надзвукового ежектора та характерні розрахункові перетини показано на рис.2.

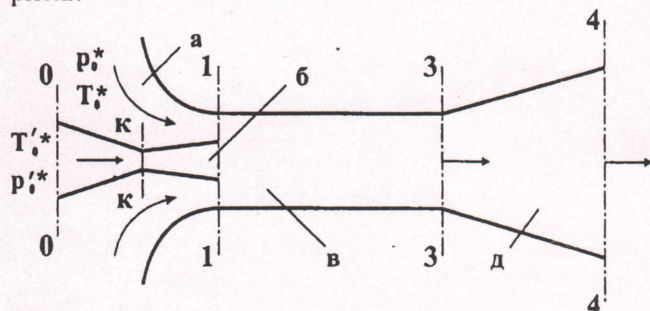


Рис.2. Принципова схема надзвукового ежектора а - сопло газу, що ежекується з газової мережі; б - сопло високонапірного газу АГНКС; в - камера змішування; д - дифузор

Газ низького тиску з газової мережі надходить до ежектора через дозвукове сопло-а, високонапірний газ виходить з великою швидкістю через надзвукове сопло-б і в камері змішування-в взаємодіє з низьконапірним. До компресорів АГНКС надходить суміш газів через дифузор-д. На рис.2 позначені характерні перетини:

- 0-0 - вхід в надзвукове сопло;
- 1-1 - вхід в камеру змішування;
- 3-3 - вихід з камери змішування;
- 4-4 - вихід з дифузора;
- к-к - критичний переріз надзвукового сопла.

Переріз 2-2 є умовним і розглядається у вигляді перерізу замикання ежектора.

Оптимальним ежектором називають ежектор, який забезпечує відсмоктування заданої кількості низьконапірного газу при мінімальній витраті високонапірного. Визначення оптимального ежектора - це, насамперед, пошук геометричних параметрів на найвигіднішому режимі його роботи. При заданих умовах оптимальний ежектор має максимально можливий ККД.

Основними геометричними параметрами ежектора є коефіцієнт α , який дорівнює відношенню вихідних перерізів надзвукового та дозвукового сопел ($\alpha = f_1 / f_2$), та відносна площа критичного перерізу надзвукового сопла f_{cr} / f_1 .

Роботу ежектора характеризують такі безрозмірні величини: ступінь підвищення тиску $\varepsilon = p_4^* / p_0^*$; ступінь підвищення ентальпії $\tau = i_4^* / i_0^*$; характерне відношення тепловмістів $\nu = i_0^* / i_0'^*$; характерне відношення тисків $\sigma = p_0^* / p_0'^*$; коефіцієнт ежекції $K = G_e / G_p$.

В загальному випадку система рівнянь процесу змішування газів з різними фізичними властивостями складається з п'яти рівнянь ежекції з 16 змінними величинами [3].

При відомих параметрах змішуваних потоків та ступеня підвищення тиску ε до системи рівнянь необхідно додати додаткові співвідношення, які визначаються умовами роботи сопел та дифузора і взаємодією потоків на початку камери змішування.

В випадку ежекування АГНКС змішуються потоки одного газу з різними тисками, тобто вони мають однакові показники адиабати ($k = k$). Отже, система рівнянь спрощується до вигляду:

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{K}{\nu} + 1\right)(K + 1)} \cdot \frac{v_{43} \cdot v_{10} \cdot \sigma \cdot q(\lambda_1')}{(\alpha + 1) \cdot q(\lambda_3)}; \quad (1)$$

$$\tau = \frac{K + \nu}{K + 1}; \quad (2)$$

$$z(\lambda_3) = \frac{\frac{K}{\sqrt{\nu}} \cdot z(\lambda_1) + z(\lambda_1')}{\sqrt{\left(\frac{K}{\nu} + 1\right)(K + 1)}}; \quad (3)$$

$$\frac{K}{\sqrt{\nu}} = \frac{\alpha \cdot v_{10} \cdot q(\lambda_1)}{\sigma \cdot v_{10}' \cdot q(\lambda_1')}; \quad (4)$$

де $q(\lambda)$, $z(\lambda)$ - газодинамічні функції в відповідних перерізах, v_{10} , v_{10}' , v_{43} - коефіцієнти втрат тиску на відповідних ділянках ежектора.

При відомих параметрах змішуваних потоків в вихідних перерізах сопел рівняння (1) дає два можливих значення ε на режимах, коли в камері

змішування реалізується надзвукова течія ($\lambda_3 > 1$), або дозвукова ($1/\lambda_3 < 1$). Рівняння (3) при $z(\lambda_{3max}) > z(\lambda_3) > 2$ також дає два можливих значення λ_3 , які відповідають, відповідно, надзвуковій течії ($\lambda_3 > 1$) та дозвуковій ($\lambda_3 < 1$). Тобто, дозвукова течія виникає з надзвукової в прямому стрибку ущільнення в камері змішування.

З усієї різноманітності можливих режимів роботи для пошуку оптимального надзвукового ежектора розглянуто критичний режим з замиканням, коли швидкість потоку дозвукового струменя в перерізі 2-2 досягає швидкості звуку.

При умові відповідних відношеннях тисків $\sigma^* < \sigma < \sigma_{max}$ надзвуковий струмінь працює в режимі недорозширення. Отже, серед можливих величин $f_{кр}/f_1$ буде й таке, при якому в умовах АГНКС $\eta_{ад}$ досягне максимального значення і ежектор буде оптимальним.

Для визначення основних геометричних параметрів ежектора в середовищі Microsoft Excel з використанням можливостей пакету програм Maple 7 був реалізований алгоритм рішення рівнянь ежекції (1-4) разом з рівняннями для визначення втрат повного тиску в соплах і дифузори та додаткових умов, що визначають критичний режим течії.

Аналіз результатів дослідження

В результаті розрахунків були отримані значення основних геометричних розмірів ежектора:

- відношення площ критичного і вихідного перетинів в надзвуковому соплі $f_{кр}/f_1 = 0,125$;
- діаметр критичного перетину в надзвуковому соплі $d_{кр} = 0,004$ м;
- діаметр камери змішування $d_1 = 0,021$ м;
- відношення площ вхідного та вихідного перетинів дифузора f_3/f_2 .

В таблиці 1 наведено значення повного тиску робочого потоку p_0^* , необхідного для одержання на вході в компресори тиску $p_1 = 1,2$ МПа, коефіцієнта ежекції K , масової витрати газу, що ежекується G_e та об'ємної продуктивності АГНКС в стандартних атмосферних умовах при різних значеннях тиску p_0^* в мережі.

Таблиця 1

Результати розрахунку ежектора

p_0^* , МПа	p_1 , МПа	K	G_e , кг/с	p_0^* , МПа	$V_{АГНКС}$, м ³ /год
0,30	1,21	0,313	0,166	25,0	814,7
0,35	1,21	0,360	0,196	24,0	960,3
0,50	1,20	0,564	0,251	21,0	1230,7
0,60	1,20	0,710	0,290	19,2	1417,9
0,70	1,21	0,887	0,328	17,4	1605,1
0,75	1,20	0,990	0,347	16,5	1698,6
0,80	1,22	1,118	0,368	15,5	1802,6
0,85	1,22	1,249	0,387	14,6	1896,2
0,90	1,23	1,400	0,406	13,7	1989,8
1,00	1,20	1,783	0,447	11,8	2187,4
1,10	1,20	2,283	0,485	10,0	2374,6

За даними таблиці 1 побудовані залежності відповідних параметрів від тиску в газовій мережі, які представлені на рис. 3-5.

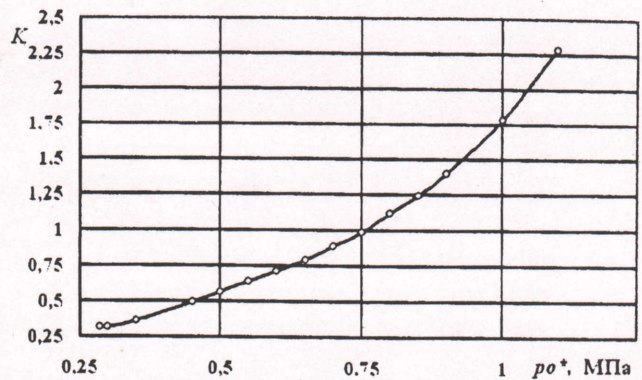


Рис.3. Залежність коефіцієнта ежекції K від тиску в газовій мережі

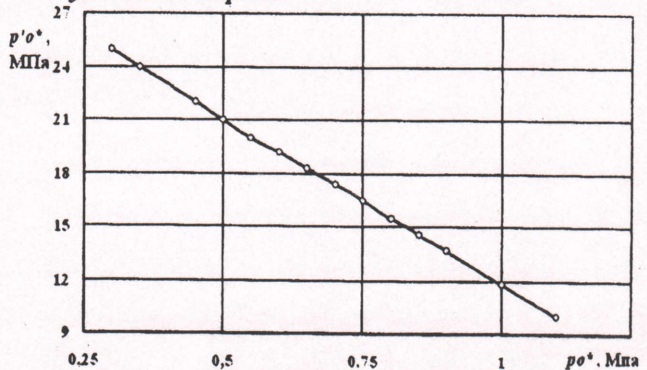


Рис.4. Залежність потрібного тиску робочого газу від тиску в газовій мережі

При збільшенні тиску в газовій мережі p_0^* коефіцієнт ежекції K надзвукового ежектора нестримно зростає, що обумовлено збільшенням витрати газу через дозвукове сопло при умові $\lambda_3 = 0,5 = const$. При цьому дозвукове сопло при збільшенні p_0^* все більше переходить на докритичний режим течії (λ_1 зменшується від $\lambda_1 = 0,91$ при $p_0^* = 0,3$ МПа до $\lambda_1 = 0,53$ при $p_0^* = 1,1$ МПа).

Необхідність такого зменшення λ_1 пояснюється виконанням умови $\sigma^* < \sigma < \sigma_{max}$ для реалізації $\eta_{ад} - \eta_{адmax}$ при $f_{кр}/f_1 = 0,125$. Виявлено зменшення величин σ від $\sigma = 81,8$ при $p_0^* = 0,3$ МПа до $\sigma = 9,1$ при $p_0^* = 1,1$ МПа при $\sigma^* = 1,85$ та $\sigma_{max} = 195$.

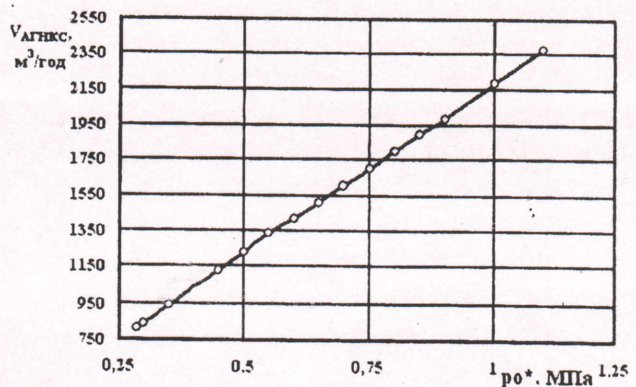


Рис.5. Залежність витрат газу АГНКС від тиску в газовій мережі

Об'ємна продуктивність АГНКС в стандартних атмосферних умовах при збільшенні тиску в газовій мережі від $p_0^*=0,3$ МПа до $p_0^*=1,1$ МПа збільшується лінійно майже в 3 рази, при цьому залежність потрібного тиску робочого газу від тиску в газовій мережі, що надана на рис.4, має статус закону управління регулятора тиску газу-8 (див. рис.1), невиконання якого приводить до замикання дозвукового сопла.

Аналіз ефективності використання струминного дотискувача

Ефективність використання струминного дотискувача може бути оцінена за допомогою спрощеного показника економічного ефекту, що визначається за формулою [2]:

$$E = V_{\text{АГНКС}} \cdot (c_1 - c_2) - N \cdot c_3,$$

де $V_{\text{АГНКС}}, \text{ м}^3 / \text{год}$ - об'ємна продуктивність АГНКС при нормальних параметрах;

$c_1, \text{ грн/м}^3$ - відпускна ціна 1 м^3 газу на АГНКС;

$c_2, \text{ грн/м}^3$ - ціна закупівлі 1 м^3 газу;

$N, \text{ кВт}$ - потужність компресорів АГНКС, при заданій густині газу на вході в компресори;

$c_3, \text{ грн./кВтгод}$ - ціна електроенергії, що витрачається..

Результати розрахунку економічного ефекту ежектора обраної конфігурації при використанні струминного дотискувача при умові цін $c_1=0,78$ грн/м³, $c_2=0,34$ грн/м³, $c_3=0,1$ грн/кВтгод, наведено на рис.6.

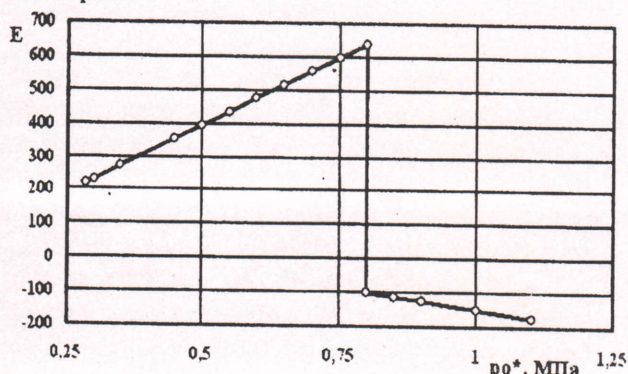


Рис.6. Залежність економічного ефекту від тиску в газовій мережі

К. И. Капитанчук, кандидат технических наук, С. П. Онищенко, О. Г. Быкова

Оптимальный сверхзвуковой эжектор в качестве подпорного компрессора

Приведены расчетные исследования сверхзвукового эжектора с целью применения в качестве подпорного компрессора на входе в блок компрессорных станций в условиях снижения давления в сетях природного газа

K.Kapitanchuk, S.Onischenko, O. Bykova

The optimum supersonic ejector as an additional compressor

Calculated research of the supersonic ejector with the aim of using it as an additional compressor on the input in the block of the compressor station in conditions of lowering of the pressure in the natural gas networks is presented

Аналіз зміни економічного ефекту використання ежектора в принциповій схемі АГНКС дозволяє зробити висновки про доцільність його використання при тиску в газовій мережі від $p_0^*=0,3$ МПа до $p_0^*=0,8$ МПа. При $p_0^*>0,8$ МПа потреби в використанні ежектора немає.

Висновки

В результаті розрахунків були отримані такі значення основних геометричних розмірів ежектора:

- відношення площ критичного і вихідного перетинів в надзвуковому соплі $f_{кр}'/f_1' = 0,125$;

- діаметр критичного перетину в надзвуковому соплі $d_{кр}' = 0,004 \text{ м}$;

- діаметр камери змішування $d_1 = 0,021 \text{ м}$;

- відношення площ вхідного та вихідного перетинів дифузора $f_3/f_4 = 0,2$.

Використання надзвукового ежектора в якості дотискувача струминного компресора АГНКС дозволяє забезпечити роботу компресорної установки і заправку автотранспорту в умовах зниженого тиску в газовій мережі від $p_0^*=0,3$ МПа до $p_0^*=0,8$ МПа. При $p_0^*>0,8$ МПа потреби в використанні ежектора немає.

Залежність потрібного тиску робочого газу від тиску в газовій мережі, що надана на рис.4, має статус закону управління регулятора тиску газу, невиконання якого приводить до замикання дозвукового сопла.

Література

1. Довідник працівника газотранспортного підприємства // В.В. Розганюк та ін. - К.: Росток, 2001. - 1092 с.

2. Орлов І.О. Економічний моніторинг роботи АГНКС // Нафтова і газова промисловість. 2003, №6, с. 3-6.

3. Васильев Ю.Н. Теория сверхзвукового газового эжектора с цилиндрической камерой смешения. // Сб. Лопаточные машины и струйные аппараты. Выпуск 2. -М.: Машиностроение, 1969. с.171-235.