

УДК 621.694.2:629.3.082.3(045)

 Капітанчук К.І., канд. техн. наук
 Національний авіаційний університет
 Бикова О.Г.

 Державний комітет з енергозбереження України
 Оніщенко С.П.
 ТОВ «Інвесттехнологія»

РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНОГО НАДЗВУКОВОГО ЕЖЕКТОРА В ЯКОСТІ ДОТИСКУЮЧОГО СТРУМИННОГО КОМПРЕСОРА

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.

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.

Проблема газифікації автомобілів в Україні та один із шляхів її вирішення

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.

В 2004 році Міністерством транспорту України заплановано розпочати масоване переведення державних автомобілів на газодизельний цикл, який зменшує долю паливних втрат до 31%, а природного газу — до 25%. 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 всього 300 млн. м³. В 2003 році заплановані збитки НАК «Нафтогаз України» від невикористання можливостей АГНКС склали біля 70 млн. грн. [2].

Однією з основних причин такого становища 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 дотискувача електропневматичного типу, що значно погіршить економічні показники АГНКС.

Авторами статті проведені розрахунки можливості використання надзвукового ежектора — струминного апарату в якості дотискувача, в якому для підвищення енергії одного потоку газу використовується енергія іншого потоку газу. В конструкції АГНКС така можливість існує.

Перевагами використання такого методу є:

- відсутність споживання електроенергії;
- мала вартість виготовлення та монтажу;

- простота конструкції та малі габаритні розміри;
- відсутність необхідності в технічному обслуговуванні та ін.

Аналіз роботи АГНКС з дотискувачем компресором ежекторного типу

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

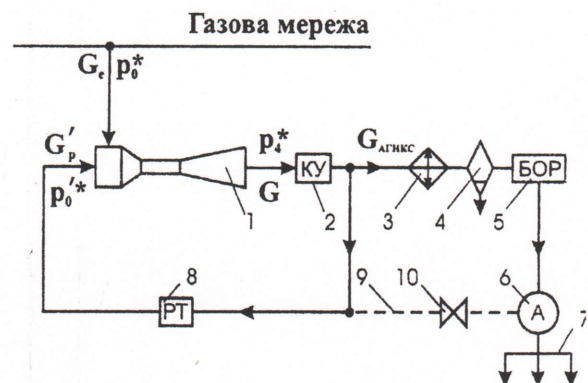


Рис. 1. Спрощена схема АГНКС-500 з використанням ежектора для підвищення тиску на вході в компресорну установку: 1 — ежектор; 2 — компресорна установка; 3 — апарат повітряного охолодження; 4 — вологомасловідділювач; 5 — блок осушення газу і регенерації; 6 — акумулятор; 7 — заправна галерея; 8 — регулятор 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



багатоступневих 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 переक्रивається підведення газу на заправну галерею до поповнення акумулятора.

Пропонується підтримувати тиск на вході в компресорну установку p_p^* 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.

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. Дифузор — д призначений для вирівнювання потоку газу на вході в компресорну установку АГНКС.

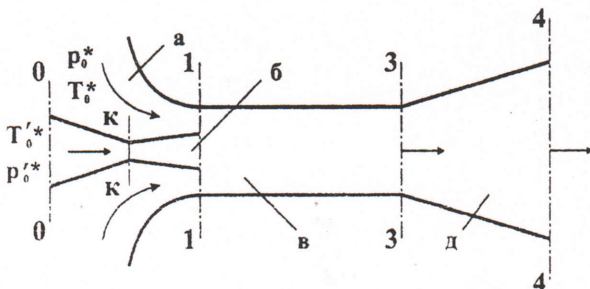


Рис. 2. Принципова схема надзвукового ежектора:

а — сопло газу, що ежекується з газової мережі; б — сопло високонапірного газу АГНКС; в — камера змішування; д — дифузор.

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 газу. 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 ($\alpha = f_1/f_1'$), та відносна площа критичного перерізу надзвукового сопла f_{kp}'/f_1' .

Роботу ежектора характеризують такі безрозмірні величини: ступінь підвищення тиску $\tau = i_4^*/i_0^*$; ступінь підвищення ентальпії $\varepsilon = p_4^*/p_0^*$; характерне відношення тепловмістів $\nu = i_0^{**}/i_0^*$; характерне відношення тисків $\sigma = p_4^*/p_0^*$; 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 газу з газової мережі в АГНКС змішуються потоки одного газу з різними тисками, тобто вони мають однакові показники адиабати ($k' = k$).

Отже, система рівнянь ежекції, яка складається в результаті сумісного рішення рівнянь збереження маси, енергії, стану та кількості руху для вхідного і вихідного перерізів камери змішування, спрощується до вигляду:

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

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

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

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

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 надзвуковій течії ($\lambda_3' > 1$) та дозвуковій ($\lambda_3' < 1$). Отже, дозвукова течія виникає з надзвукової в прямому стрибку ущільнення в камері змішування [3].

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 відношень тисків $\sigma^* \ll \sigma < \sigma_{max}$ надзвуковий струмінь працює в режимі недо-розширення. Отже, серед можливих величин f_{kp}'/f_1' буде й така, при якій в умовах АГНКС η_{ao} досягне максимального значення і ежектор буде оптимальним.

Для визначення основних геометричних параметрів ежектора в середовищі Microsoft Exel з використанням можливостей пакету програм Maple 7, інтегрованих у це середовище, 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 такі значення основних геометричних розмірів ежектора:

- відношення площ критичного і вихідного перетинів в надзвуковому соплі $f_{kp}'/f_1' = 0,125$;
- діаметр критичного перетину в надзвуковому соплі $d_{kp}' = 0,004$ м;
- діаметр камери змішування $d_1 = 0,021$ м;
- відношення площ вхідного та вихідного перетинів дифузора $f_2/f_3 = 0,2$.

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

Результати розрахунку ежектора

p_0^* , МПа	P_1 , МПа	K	G_e , кг/с	p_0^* , МПа	V_{AGHKS} , 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
0,45	1,20	0,493	0,230	22,0	1126,7
0,50	1,20	0,564	0,251	21,0	1230,7
0,55	1,20	0,642	0,273	20,0	1334,7
0,60	1,20	0,710	0,290	19,2	1417,9
0,65	1,20	0,794	0,309	18,3	1511,5
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

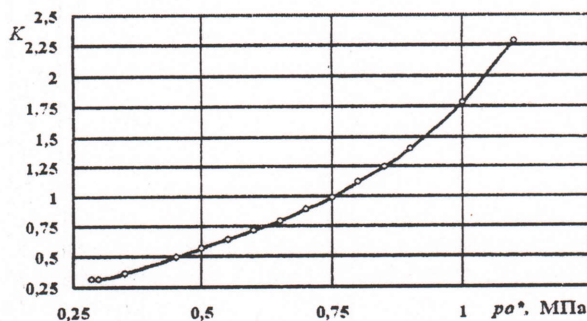


Рис. 3. Залежність коефіцієнта ежекції K від тиску в газовій мережі.

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 $\lambda_3 = 0,5 = \text{const}$.

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).

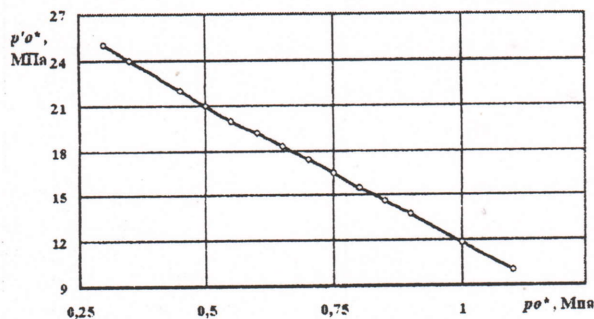


Рис. 4. Залежність потрібного тиску робочого газу від тиску в газовій мережі.

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 $\sigma_{max} = 195$.

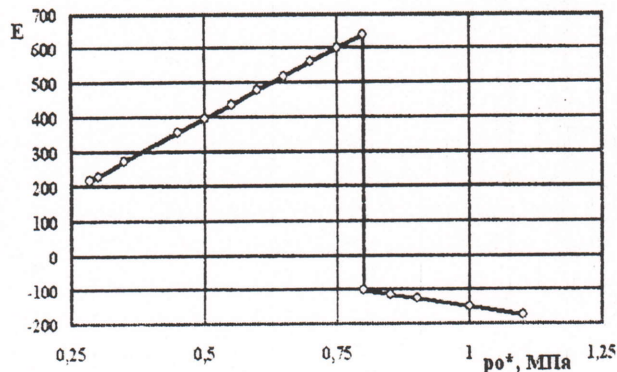


Рис. 5. Залежність витрат газу АГНКС від тиску в газовій мережі.

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 показана на рис. 4, має статус закону управління регулятора тиску газу — 8 (рис. 1), невиконання якого приводить до замикання дотискувального сопла.

Аналіз ефективності використання струминного дотискувача

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

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

де $V_{АГНКС}$, м³/год — об'ємна продуктивність АГНКС при нормальних параметрах; c_1 , грн/м³ — відпускна ціна 1 м³ газу; c_2 , грн/м³ — ціна закупівлі 1 м³ газу; N , кВт — потужність компресорів АГНКС, при заданій густині газу на вході в компресори; c_3 , грн/кВтгод — ціна електроенергії.

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 показано на рис. 6.

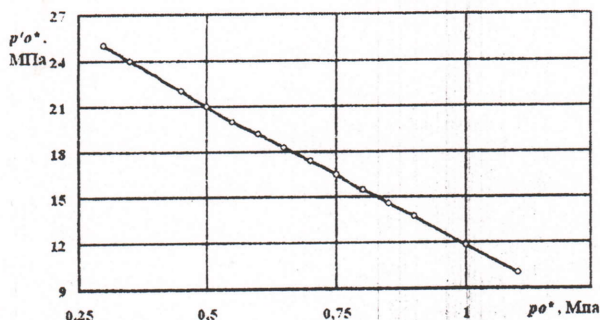


Рис. 6. Залежність економічного ефекту від тиску в газовій мережі.

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 значення основних геометричних розмірів надзвукового ежектора, використання якого в якості дотискувального 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.

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 // Лопаточные машины и струйные аппараты. — Вып. 2. — М.: Машиностроение, 1969. — С. 171—235.